

ROBÓTICA Y MECATRÓNICA



Ramos Arreguín Juan Manuel
Vargas Soto José Emilio
Gorrostieta Hurtado Efrén

Robótica y Mecatrónica

1ª Edición

Ramos Arreguín Juan Manuel
Vargas Soto José Emilio
Gorrostieta Hurtado Efrén

“Robótica y Mecatrónica”
Ramos Arreguín Juan Manuel
Vargas Soto José Emilio
Gorrostieta Hurtado Efrén

© Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
México.

Internet: http://www.mecamex.net

1ª Edición, 19 de Mayo del 2018

ISBN 978-607-9394-14-1

Impreso en México – Printed in Mexico

.

Prólogo

La Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. tiene como misión impulsar el conocimiento y el desarrollo de la Ingeniería Mecatrónica a través de vincular empresas e industrias con instituciones de educación superior, esto con el propósito de buscar elementos de colaboración para difundir, actualizar y/o desarrollar innovaciones tecnológicas orientadas a generar beneficios en la sociedad. En este sentido, la presente obra intelectual se ha preparado durante varios meses a fin de celebrar el talento y la creatividad de entusiastas de la Ingeniería Mecatrónica en México.

En este libro, el lector encontrará información técnica relevante sobre diversos proyectos de robótica y mecatrónica en diferentes áreas del conocimiento, como son: manufactura automatizada, educación y docencia, energías alternativas y renovables, procesamiento de señales, modelación y simulación de máquinas mecatrónica, sistemas embebidos y desarrollo de prototipos, entre otras.

Confío en que el trabajo aquí presentado sea de utilidad a quienes de alguna forma se encuentran estudiando, investigado o bien realizando un trabajo profesional en donde los robots y las máquinas mecatrónicas propician beneficios en la sociedad.

Lic. Jorge Enrique Orozco Ramírez
Presidente
Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Índice

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 1, pp. 1-14.
ISBN: 978-607-9394-14-1



Desarrollo de un Robot Gusano Capaz de Desplazarse en Terreno Natural

Sandoval Castro X. Yamile[1], Castillo Castañeda Eduardo[2] y Ruíz Torres F. Maximiano[2]

[1] CONACYT-IPN.
[1] CONACYT-IPN. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090.
[2] IPN. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090

Resumen

Se presenta el diseño bio-inspirado de un robot gusano utilizando módulos 1D en conexión cadena. Se utilizó un algoritmo de locomoción basado en generadores sinusoidales que fue simulado en MATLAB para los planos horizontal e inclinado. Se evaluó teórica y experimentalmente el comportamiento del algoritmo variando los parámetros de ondulación, fase y ángulo de serpenteo, los resultados fueron comparados de manera gráfica pudiendo observar que el robot se comporta de la misma manera que el modelo teórico para todos los parámetros; siendo notorio que el número de ondulaciones más eficiente es 2 y 3, para el robot gusano la fase es 0° y el ángulo de serpenteo puede variar de -65° a 65° por limitaciones mecánicas. El robot fue puesto a prueba en terreno natural, pasto, superficie inclinada de concreto (30°) y la superficie rocosa de un estacionamiento, se observó que el robot gusano tiene una estructura rígida que le permite desplazarse sin problema en terreno natural.

Palabras clave: Robot bio-inspirado, Robótica modular, Locomoción, Generador sinusoidal, Ángulo de serpenteo, Ondulaciones, Fase.

1. Introducción

El colapso de edificios conduce al daño o pérdida de vidas humanas; una búsqueda rápida de víctimas confinadas es indispensable para evitar pérdidas adicionales. Sin embargo, el acceso al área colapsada es restringida por el riesgo y la estrechez. Para buscar sobrevivientes en este tipo de entornos los robots móviles modulares son más eficientes porque pueden desplazarse en entornos estrechos y profundos, aunque se debe asegurar que el robot sea capaza de moverse en terreno natural.

El KAEROT-snake III [1], es un robot serpiente con módulos 2D capaz de moverse en el espacio, sin embargo, su aplicación está limitada a la inspección interna de tuberías. En [2] se desarrolló un robot de arrastre peristáltico que es capaz de moverse establemente en un espacio estrecho, el robot se acciona a través de un músculo artificial operado por la presión de aire; su desempeño fue evaluado en tuberías. En [3] se presenta el diseño de un robot bio-inspirado en el gusano “caenorhabditis elegans”, se validó experimentalmente la estrategia de control para elegir una ruta en un experimento controlado en una superficie plana. En [4] se muestra el diseño de un robot de arrastre peristáltico que es actuado por un sistema neumático a prueba de fuego; se compone de 8 unidades alternadas con 6 juntas, su funcionamiento fue validado en una tubería. En [5] se propone un modelo matemático de locomoción basado en mediciones y datos de la estructura de conexión neuronal para la simulación de un robot modular en conexión cadena; los autores no construyeron el robot y tampoco se hizo una validación experimental del algoritmo de locomoción.

ISBN: 978-607-9394-14-1



El trabajo presentado en [6] es un robot gusano compuesto de 7 actuadores para generar el desplazamiento, los autores muestran un algoritmo de locomoción basado en ondas sinusoidales, además de su controlador, no se evaluó el comportamiento del robot experimentalmente. En [7] se propone un prototipo de robot rastrero con la finalidad de evaluar la locomoción de una oruga, lográndose propagar una onda trapezoidal de la cola a la cabeza en el plano vertical; el algoritmo de locomoción fue modelado por una cadena serial de 5 eslabones. En [8] se implementó un algoritmo de locomoción basado en ondas triangulares y trapezoidales en un robot gusano escalador. En [9] se presenta el segmento miniaturizado de un robot gusano que usa solenoides para imitar la locomoción de las lombrices, el robot se compone de 5 segmentos y puede desplazarse en el plano, es capaz también de girar con ayuda de dos actuadores extra.

Existen diversos robots bio-inspirados en gusanos y serpientes [10-14], construidos con materiales flexibles y rígidos; la mayoría de los robots presentados están enfocados al estudio de algoritmos de locomoción y su aplicación a la inspección en tuberías de distintos diámetros. Sin embargo, el desempeño del robot es evaluado a través de experimentos controlados.

El diseño de robots de rescate, inspección y vigilancia deben asegurar su capacidad de desplazamiento en terreno natural para poder navegar en áreas colapsadas, espacios confinados, etc; lo que se puede lograr a través de la combinación de una estructura mecánica rígida y un adecuado algoritmo de locomoción. En este trabajo se presenta el diseño de un robot bio-inspirado en un gusano, cuya estructura mecánica es lo suficientemente rígida para que el robot logre desplazarse en terreno natural.

2. Diseño de la estructura mecánica

La fusión de la biología y la robótica ha permitido abordar los problemas desde distintas perspectivas. La robótica modular configurable consiste en construir robots formados por módulos con la capacidad de ensamblarse unos con otros, [15]. esto presenta ventajas como la versatilidad, la fiabilidad y el bajo coste.

La estructura mecánica está bio-inspirada en un gusano, tomando en cuenta el área de la robótica modular y la topología 1D en conexión "cabeceo-cabeceo". Cada módulo (modelo hexaédrico) tiene 1GDL y fue construido utilizando tecnología de impresión 3D. La figura 1 muestra el módulo en distintas orientaciones, mientras que la tabla 1 muestra sus parámetros geométricos, longitud (L), los segmentos L1 y L2, altura (H), ancho (W) y el ángulo de doblaje (ϕ) que se forma entre los segmentos L_1 y L_2 y que físicamente está restringido entre -65° y 65°; se utilizó el servomotor digital Dynamixel AX-12A.

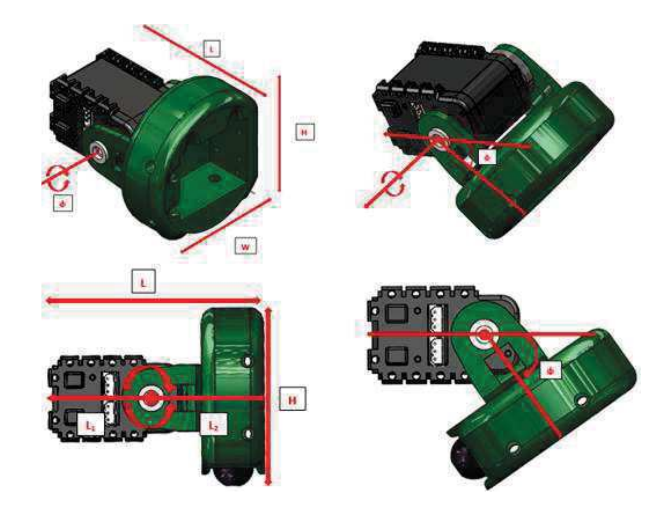


Tabla 1: Parámetros del módulo.

Parámetro	Valor (mm)
L	80.84
L_1	L/2
L_2	L/2
H	64.30
W	67.335
ϕ	Variable

Figura 1. Módulo 1D para formar el robot gusano.

ISBN: 978-607-9394-14-1



El robot se compone de 11 módulos conectados en cadena, como se observa en la figura 2. La cantidad de módulos es directamente proporcional a la definición del algoritmo de locomoción.

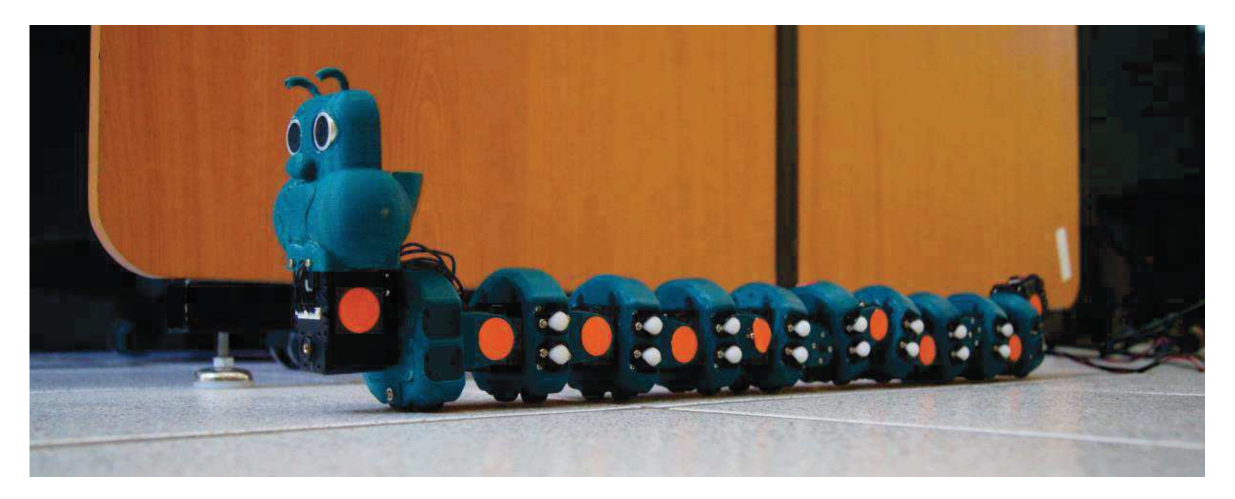


Figura 2. Robot gusano.

3. Algoritmo de locomoción y su implementación

La locomoción, desde el punto de vista biológico, se refiere a la capacidad de los seres vivos, y en específico del reino animal para trasladarse de un lugar a otro, esto, en áreas acuáticas o terrestres. La locomoción está dividida en dos niveles: inferior y superior. El nivel inferior se encarga del control y la coordinación de los músculos. En el caso de los robots, este tipo de nivel involucra el movimiento y control de cada uno de los actuadores para lograr la locomoción deseada. Por otro lado, el nivel superior, se encarga de la planificación de trayectorias, navegación y de otras tareas que el individuo realiza de forma rápida y compleja. Este trabajo está limitado al nivel inferior.

3.1 Modelo matemático.

El modelo matemático empleado para la locomoción del robot es bio-inspirado, se bsa en generadores sinusoidales, donde cada articulación recibe una señal eléctrica. Entre mayor sea el número de módulos, mayor será la resolución del generador sinusoidal. La ecuación (1) presenta la curva serpentoide discreta que describe la locomoción del robot gusano.

$$\alpha_i(\varphi) = \alpha \cos\left(\varphi + \frac{2\pi k}{M}(i-1)\right) \quad (1)$$

La tabla 2 describe los elementos de la ecuación (1), donde α_i se define como el ángulo que se forma entre el segmento izquierdo de la articulación i con respecto al eje horizontal X, entonces, el ángulo de serpenteo $\alpha = \alpha_1$ dado que i indica el número de articulación que va variando hasta M.

Por otro lado, la propagación de ondas de los robots ápodos está inspirada en una oruga, ya que comienzan con una ondulación en su cuerpo; iniciando desde la cola y llega hasta la cabeza. Si las ondas se propagan desde la cola hasta la cabeza, el robot se desplaza una distancia Δ_x (denominada *paso*) hacia adelante, y viceversa.

ISBN: 978-607-9394-14-1



Tabla 2: Parámetros del modelo matemático.

Parámetro	Descripción	Rango valores
k	Número de ondulaciones	$k \geq 1$
α	Ángulo de serpenteo	$[-65°, 65°]$
M	Número de articulaciones	$M \geq 2$
φ	Fase	$[-180°, 180°]$
i	Número de articulación	$[1, M]$

Las dimensiones de las ondas definen el paso. En la figura 3 se muestra la locomoción del robot cuando se utilizan dos ondas corporales de diferentes tamaños. a) se aprecia el paso obtenido para $k = 2$ y $\alpha = 55°$; b) se observa un paso menor para $k = 4$ y $\alpha = 15°$.

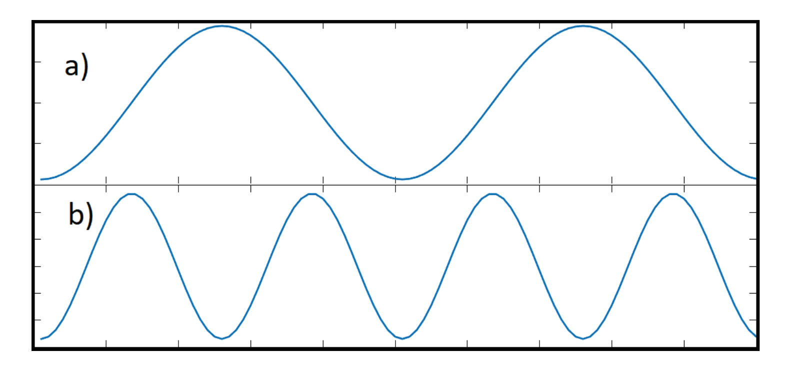


Figura 3. Diferencia de paso del generador sinusoidal.

El principio de estabilidad establece que al menos deben existir dos puntos de apoyo a lo largo del robot para mantener la estabilidad del desplazamiento. *La locomoción del robot será estáticamente estable cuando éste mantenga su centro de gravedad a la misma altura y el número de ondulaciones sea* $k \geq 2$.

El principio de mínimo número de módulos está estrechamente relacionado con el principio de estabilidad. *Para que un robot ápodo se mueva en línea recta con una locomoción estáticamente estable debe tener al menos un número mayor o igual a 5 módulos.*

Dado que el algoritmo de locomoción se basa en una ecuación discreta, existe un error al compararla con la ecuación continua. El **error de discretización**, ecuación (2), se define como el valor máximo de los errores en las dimensiones de altura y anchura.

$$\varepsilon_d = \max\{\varepsilon_h, \varepsilon_w\} \tag{2}$$

Con esta definición, se obtiene un error de discretización del 5%, tanto la altura como la anchura difieren como máximo en un 5% con respecto a las dimensiones del modelo continuo. La imagen superior de la figura 4 muestra la discretización con 11 módulos, mientras que la imagen inferior muestra una discretización ideal de 100 módulos.

ISBN: 978-607-9394-14-1



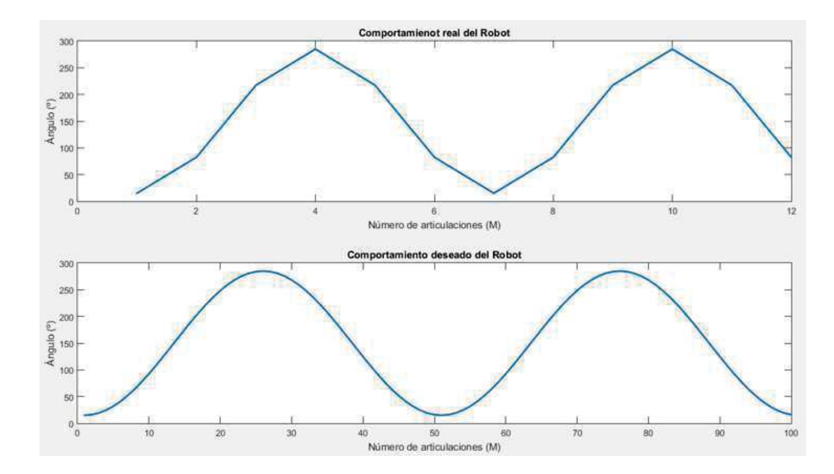


Figura 4. Discretización de la onda sinusoidal con M=11 y M=100.

Por otro lado, es posible variar tanto la anchura (w) como la altura (h) del robot en función de los parámetro k y α . En la figura 5 se muestran dos gráficas, la izquierda se varia w y h respecto a α y en la derecha respecto a k .

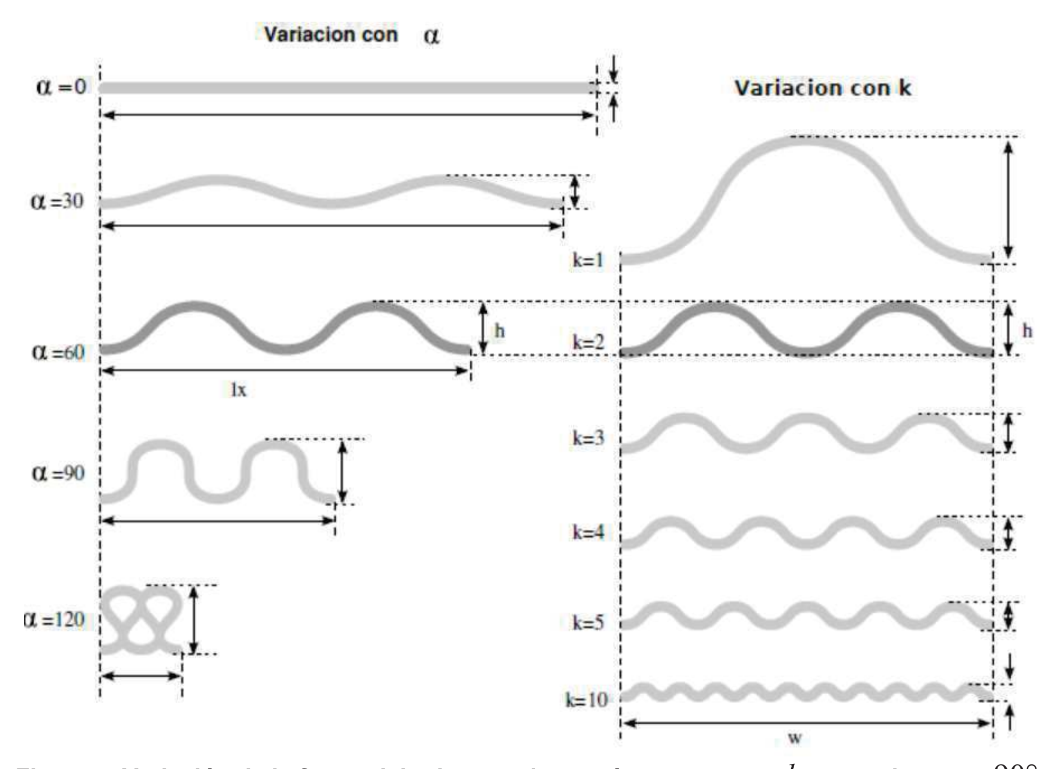


Figura 5. Variación de la forma del robot con los parámetros α y k , cuando $\varphi = -90°$.

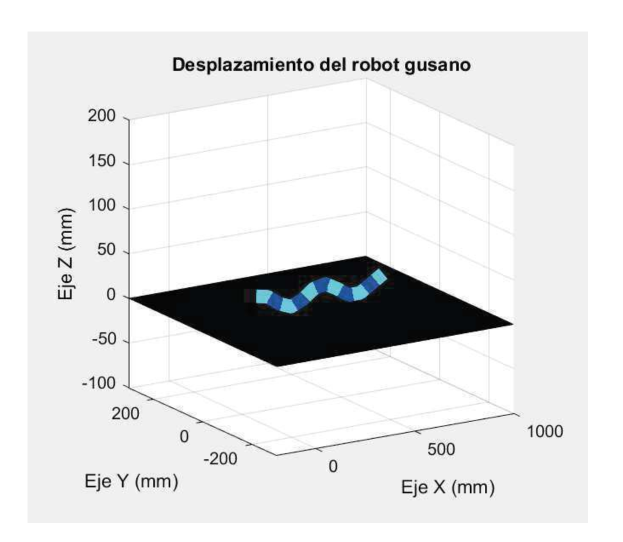
3.2 Simulación del algoritmo de locomoción.

Considerando la cinemática directa del robot gusano (en relación a la convención de Denavit-Hartenberg) fue posible realizar una simulación en alambres del desplazamiento del robot gusano en los planos horizontal e inclinado. Usando la cinemática directa se simuló el robot en MatLab, al cual se le aplicó el algoritmo de locomoción; obteniéndose una animación del desplazamiento con distintos

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 1, pp. 1-14.
ISBN: 978-607-9394-14-1



parámetros en ambos planos. La figura 6 muestra la simulación del algoritmo de locomoción en MatLab, se asignó $\alpha = 10°$, la imagen de la izquierda muestra dos ondulaciones y la derecha 3.



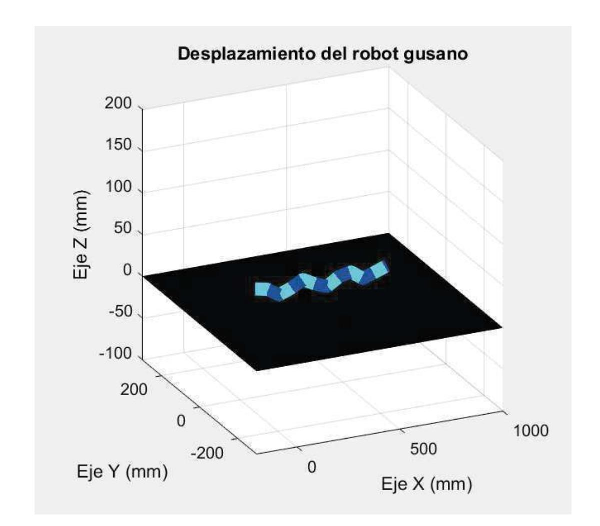
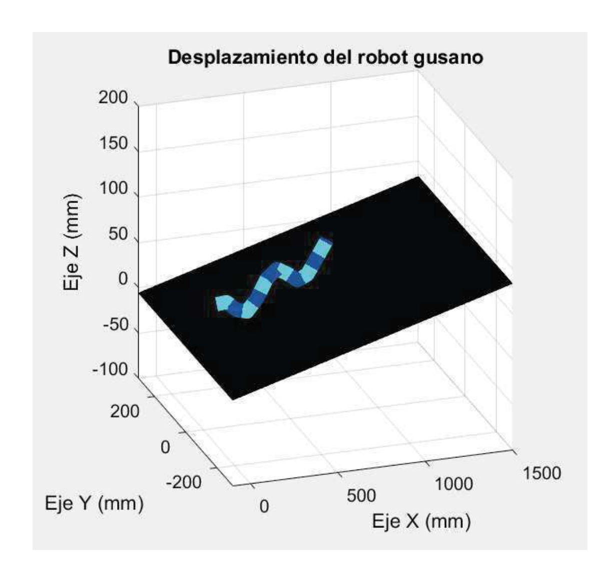


Figura 6. Simulación de la locomoción del robot gusano en un plano horizontal. Izquiera: $k = 2$, $\alpha = 10°$. **Derecha** $k = 3$ **y** $\alpha = 10°$.

La figura 7 muestra la simulación del algoritmo de locomoción en el plano inclinado (45°), con $\alpha = 15°$, donde, es posible apreciar el cambio de altura de la curva serpentoide. La imagen de la izquierda muestra dos ondulaciones y la derecha 3.



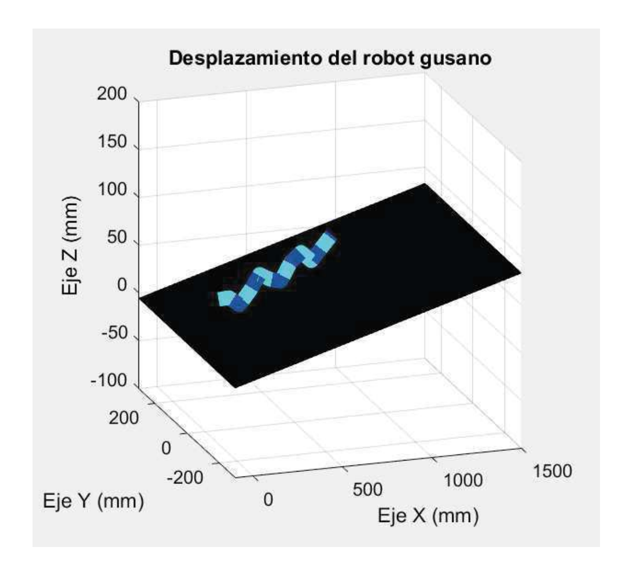


Figura 7. Simulación de la locomoción del robot gusano en un plano inclinado. Izquierda: $k = 2$, $\alpha = 15°$. **Derecha** $k = 3$ **y** $\alpha = 15°$.

4. Pruebas experimentales del robot gusano en terreno natural

En el modelo teórico es posible obtener las ondulaciones deseadas. Sin embargo, entre mayor sea el número de ondulaciones, mayor debe ser el número de articulaciones. La ecuación (3) define el

ISBN: 978-607-9394-14-1



número máximo de ondulaciones como $k_{\max}$, donde $Mu_{\min}$ representa el mínimo número de módulos por ondulación; se sabe que para tener una ondulación se requiere un mínimo de dos módulos, entonces, $Mu_{\min} = 2$. Por lo tanto, se puede obtener un máximo de 5.5 ondulaciones teniendo 11 módulos.

$$k_{\max} = \frac{M}{Mu_{\min}} = 5.5 \tag{3}$$

En el modelo continuo, por la geometría de la curva serpentinoide, el ángulo de serpenteo no puede superar los $120°$; si se excede este valor, es muy probable la colisión de puntos en la misma curva. Así mismo, existen limitaciones en el modelo discreto, debido a las restricciones mecánicas $\phi \leq 65°$.

4.1 Pruebas preliminares.

En este apartado se valida el modelo matemático empleado para la locomoción. Para verificarlo es necesario variar el número de ondulaciones (k), el ángulo de serpenteo (α) y la fase (φ); los resultados experimentales muestran cómo el robot gusano cambia su forma de acuerdo a los parámetros mencionados, dichos resultados son comparados gráficamente con los arrojados por el modelo teórico.

Variación del número de ondulaciones, k : Se varía el número de ondulaciones en el generador sinusoidal, esto repercutirá directamente en la velocidad de avance, recordando, el hecho de tener 11 módulos limita a $k \leq 5.5$. Sin embargo, la estructura mecánica no permite la visualización de las 5 ondas. Se muestran resultados para $k = 2$, $k = 3$ y $k = 4$.

La figura 8 (imagen izquierda) muestra el comportamiento del modelo teórico para 11 módulos (real) y 100 módulos (ideal), mientras que la imagen derecha muestra el comportamiento real del robot. Los parámetros utilizados fueron: $k = 2$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$.

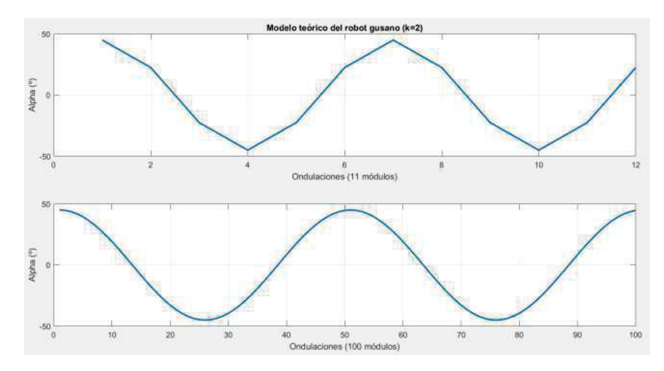




Figura 8. Forma del robot con los parámetros $k = 2$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$.

La imagen izquierda de la figura 9 muestra el comportamiento teórico del robot utilizando los parámetros $k = 3$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$, la imagen de la derecha muestra el comportamiento real.

ISBN: 978-607-9394-14-1



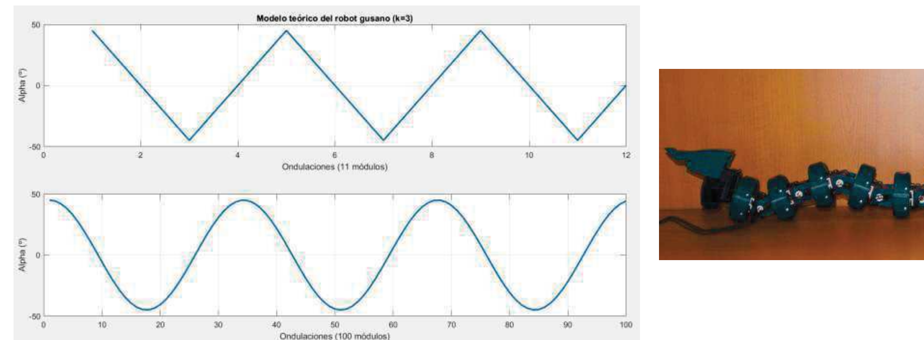




Figura 9. Forma del robot con los parámetros $k = 3$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$.

La imagen izquierda de la figura 10 muestra el comportamiento teórico del robot utilizando los parámetros $k = 4$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$, la imagen de la derecha muestra el comportamiento real.

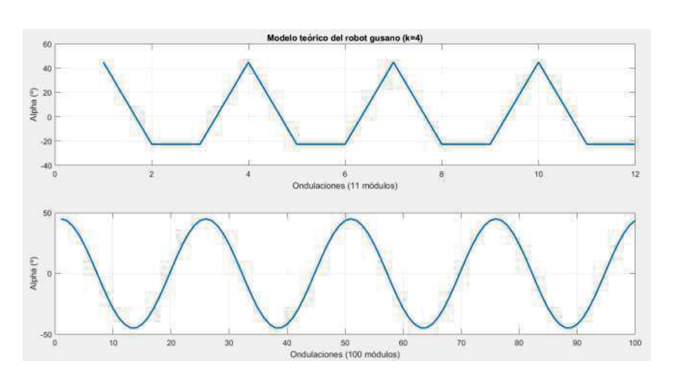




Figura 10. Forma del robot con los parámetros $k = 4$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 0°$

Variación de la fase, φ: La fase es un parámetro importante para llevar a cabo el desplazamiento del robot. En la figura 7 se puede apreciar la forma del robot con una fase $\varphi = 0°$, $k = 2$ y $\alpha = 45°$. A partir de estos parámetros se varía la fase.

La imagen izquierda de la figura 11 muestra el comportamiento teórico del robot utilizando los parámetros $k = 2$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 90°$, la imagen de la derecha muestra el comportamiento real. Como se aprecia se colocó un soporte en la cola del robot con fines de demostrar los resultados, ya que no puede sostenerse por efectos de la fuerza de gravedad.

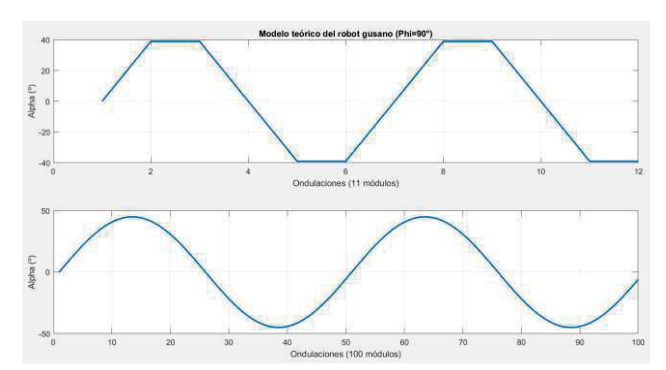




Figura 11. Forma del robot con los parámetros $k = 2$, $\alpha = 45°$ y $\varphi = 90°$.

ISBN: 978-607-9394-14-1



La imagen izquierda de la figura 12 muestra el comportamiento teórico del robot utilizando los parámetros $k=2$, $\alpha=45°$ y $\varphi=180°$, la imagen de la derecha muestra el comportamiento real. Al igual que en la figura anterior se agregó un soporte en la cola del robot.

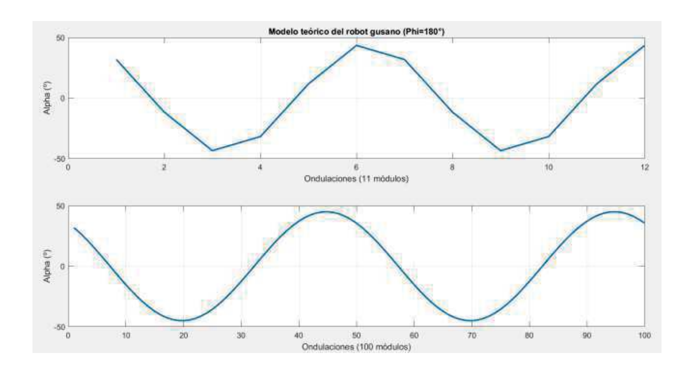




Figura 12. Forma del robot con los parámetros $k=2$, $\alpha=45°$ **y** $\varphi=180°$.

Variación de α **:** A continuación se muestra el cambio de forma del robot en función del ángulo de serpenteo. Este parámetro define la altura del robot, sin embargo, es inversamente proporcional al número de ondulaciones. Cuando $\alpha=0°$ el robot se encuentra en un estado de "reposo", es decir, su forma es una línea recta (como lo define la figura 2); las imágenes anteriores han mostrado al robot con $\alpha=45°$, con distinto número de ondulaciones y diferente fase.

La figura 13 muestra la forma del robot cuando $\alpha=15°$, $k=2$ y $\varphi=0°$; en la figura 14 se muestran los resultados teóricos y experimentales cuando $\alpha=65°$, que es el máximo valor permitido por la estructura mecánica.

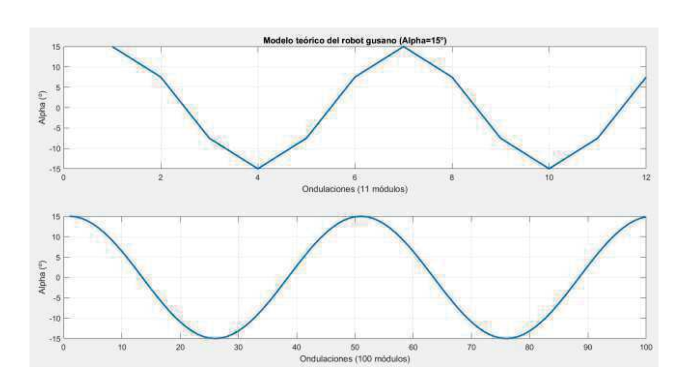




Figura 13. Forma del robot con los parámetros $k=2$, $\alpha=15°$ **y** $\varphi=0°$.

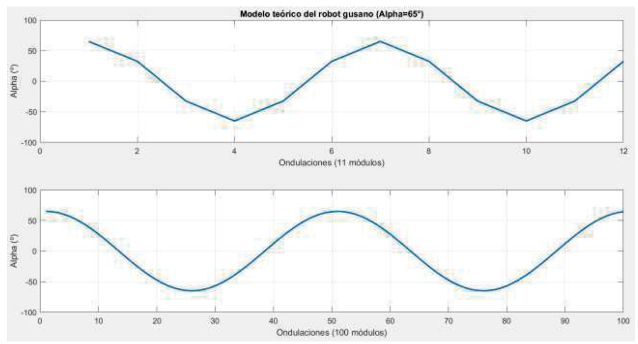




Figura 14. Forma del robot con los parámetros $k=2$, $\alpha=65°$ **y** $\varphi=0°$.

ISBN: 978-607-9394-14-1



4.2 Pruebas de locomoción en terreno natural.

En el apartado 4.1 se validó experimentalmente el funcionamiento del modelo matemático que se utilizó para la locomoción del robot gusano, se compararon gráficamente los resultados teóricos contra los reales. En este apartado se muestran los resultados experimentales del robot durante su desplazamiento en terreno natural, pasto, concreto (plano inclinado) y superficie rocosa.

En la figura 15 se muestra un diagrama a bloques del funcionamiento del sistema, como se puede observar el robot no es autónomo, tiene su cable de vida por donde se envía la energía necesaria para los actuadores, así como su señal de control y la retroalimentación. Cada motor tiene un controlador PID que le permite llegar a la posición deseada; el algoritmo de locomoción de implementó en un microcontrolador ATmega328 y la señal de control es enviada a cada motor a través del protocolo de comunicación RS232.

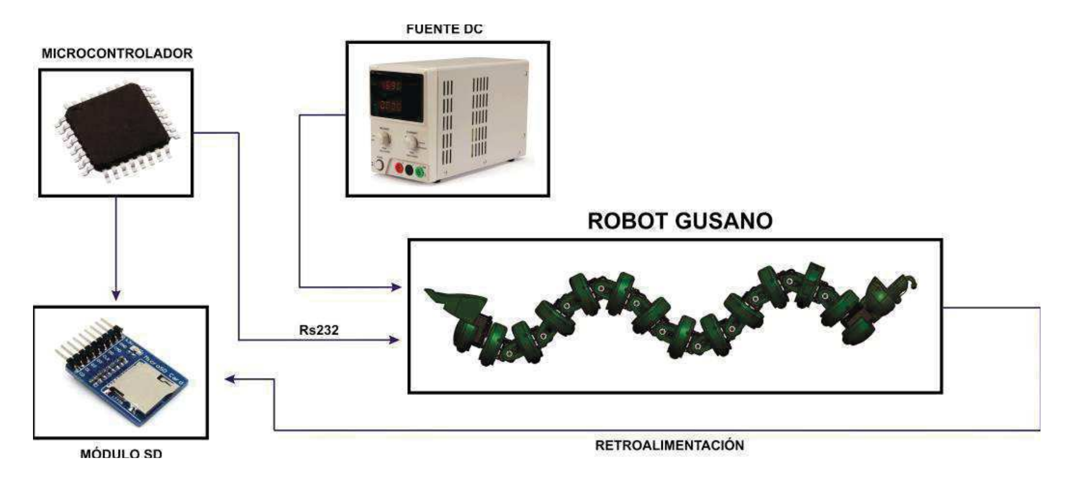


Figura 15. Diagrama a bloques del sistema.

El robot está compuesto de 11 servomotores digitales dynamixel AX-12ª que tienen integrado el microcontrolador AVR ATmega8 a 16MHz de 10bits; lo que permite retroalimentación en posición, velocidad, carga, entre otras variables. La imagen izquierda de la figura 16 muestra el rango de movimiento del actuador que va desde los $0°$ hasta los $300°$, el resto es una zona muerta. En la imagen derecha se muestra que los actuadores pueden conectarse en cadena, siendo esto una ventaja, solamente se tienen 3 cables, dos de alimentación (12V) y uno para la señal de control.

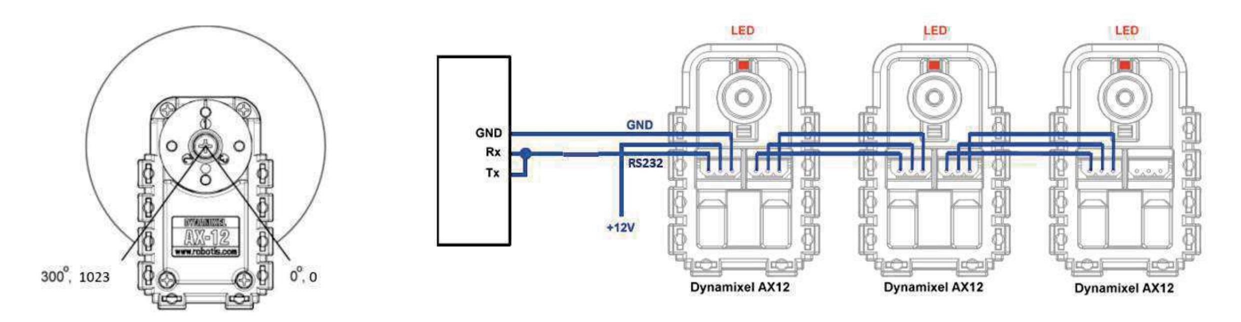


Figura 16. Rango de movimiento y conexión del servomotor Dynamixel AX-12A.

Para la adquisición de las señales de retroalimentación es necesario hacer algunos ajustes. La ecuación 4 describe la posición del motor (en grados), tomando en cuenta que el cero se encuentra en 512, así se tienen 150° en sentido horario y 150° en sentido anti horario.

ISBN: 978-607-9394-14-1



$$Pos = \left(DatoPos\left(\frac{300°}{1024} \right) \right) - 150° \tag{4}$$

El servomotor dynamixel AX-12A alcanza una velocidad angular máxima de $117.07\ rpm$. Por lo tanto, se tiene una resolución de $0.114\ rpm$, la ecuación 5 define la velocidad del motor.

$$Vel = \frac{DatoVel(0.114) - (2\pi)}{60}\left(\frac{rad}{seg} \right) \tag{5}$$

El actuador es capaz de retroalimentar la carga (I) a la que está siendo sometido en unidad de Amper (ecuación 6).

$$I = \frac{ValorI}{1000} \tag{6}$$

Sabiendo que la potencia se expresa como $P = VI$ en función del voltaje y corriente, y como $P = Mw$ en función del par y la velocidad angular; igualando ambas expresiones se obtiene la ecuación 7 que describe el par del motor (Nm).

$$M = \frac{VI}{w} \tag{7}$$

El algoritmo de locomoción fue programado en el microcontrolador con los parámetros $k = 2$, $\varphi = 0°$ y $\alpha = 30°$. Los datos de posición, velocidad y carga fueron adquiridos. Las figuras 17, 18 y 19 muestran al robot desplazándose en terreno natural, pasto, superficie inclinada de concreto y superficie rocosa, respectivamente.



Figura 17. Robot gusano desplazándose en el pasto.

ISBN: 978-607-9394-14-1



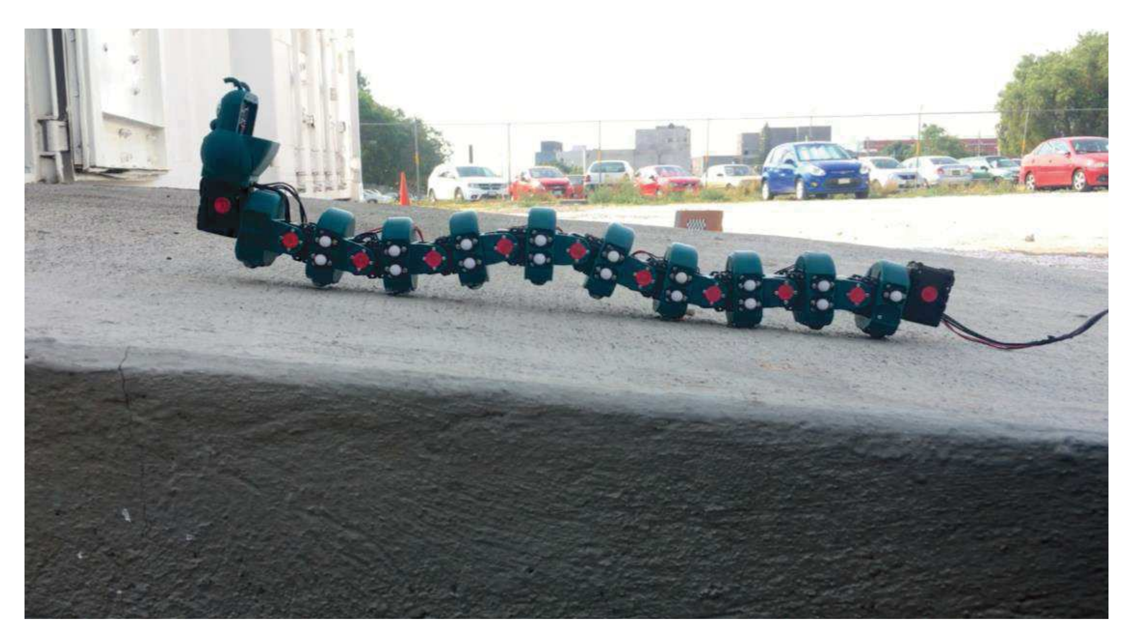


Figura 18. Robot gusano desplazándose en una superficie inclinada de concreto.



Figura 19. Robot gusano desplazándose en una superficie rocosa.

Finalmente, la figura 20 muestra los datos de posición para las 11 articulaciones durante el desplazamiento en la superficie inclinada de concreto. Nótese que la posición de todos lo motores oscila entre -20° y 20°. La velocidad y torque fueron constantes para este caso.

ISBN: 978-607-9394-14-1



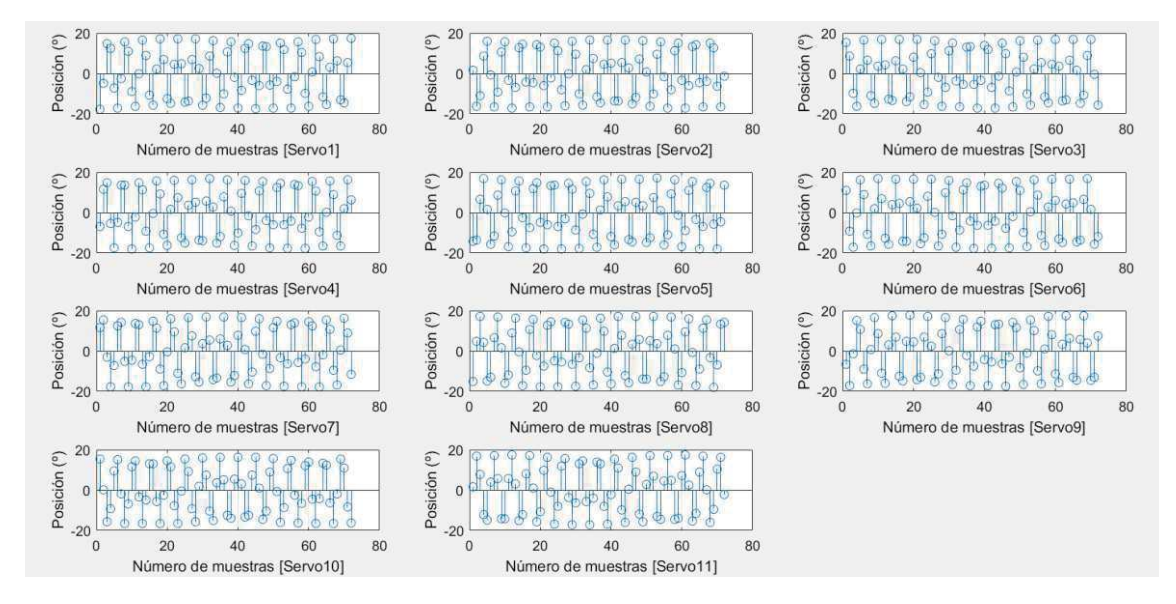


Figura 20. Robot gusano desplazándose en una superficie rocosa.

5. Conclusiones

En este trabajo se mostró el diseño de un robot bio-inspirado en un gusano considerando la robótica modular; se utilizaron módulos 1D conectados en cadena ofreciendo ventajas a la estructura mecánica, pues en caso de alguna falla solo se reemplaza ese módulo.

Se utilizó un algoritmo de locomoción basado en generadores sinusoidales. Se realizaron simulaciones del desplazamiento del robot en los planos horizontal e inclinado. Además, se variaron los parámetros en el modelo teórico y fueron comparados con los resultados experimentales; donde pudo observarse que el número de ondulaciones más eficiente es $k=2$ y $k=3$, mientras que a partir de $k=4$ se pierde la forma de onda. Se evaluó la variación de la fase, para el robot gusano se define como $\varphi=0$ de lo contrario se debe tomar en cuenta la fuerza de gravedad. También se evaluó el cambio del ángulo de serpenteo α de 15° hasta 65°, el máximo valor que puede implementarse es de 65° por las limitaciones mecánicas del robot.

En el diseño mecánico se consideró usar los servomotores digitales dynamixel AX-12A, los cuales tienen un alto torque que permite un desplazamiento eficiente en terreno natural. Estos actuadores cuentan con un microcontrolador, lo que permite tener retroalimentación en posición, velocidad y carga. Se hicieron pruebas en superficie rocosa (estacionamiento), plano inclinado (pendiente de concreto) y pasto donde el robot fue capaz de moverse sin dificultad. Se adquirieron los datos de posición para los 11 motores durante el desplazamiento del robot en la pendiente de concreto, se observó que los datos concuerdan con los del modelo teórico.

El robot tiene una estructura rígida, fue construido con tecnología de impresión 3D. El algoritmo de locomoción permite que el robot pueda desplazarse en terreno natural.

Referencias

[1] H. Shin, K. M. Jeong and J. J. Kwon. "*Development of a Snake Robot Moving in a Small Diameter Pipe*", International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 1826-1829. Gyeonggi-do, Korea 2010.

ISBN: 978-607-9394-14-1



[2] R. Ishikawa, T. Tomita, Y. Yamada and T. Nakamura. "*Development of a peristaltic crawling robot for long-distance complex line sewer pipe inspections*", International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, pp. 1826-1829, Banff, AB 2016.

[3] J. H. Boyle, S. Johnson and A. A. Dehghani-Sanij. *"Adaptive Undulatory Locomotion of a C. elegans Inspired Robot"*, *Transactions on Mechatronics*. IEEE/ASME, Vol. 8, Número, pp. 439-448 2013.

[4] Y. Tanise, T. Kishi, S. Yamazaki, Y. Yamada and T. Nakamura. *"High-speed response of the pneumatic actuator used in a peristaltic crawling robot inspecting long-distance gas pipes"*, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, pp. 1234-1239, Banff, AB 2016.

[5] Z. Soh, M. Suzuki, Y. Kurita and T. Tsuji. *"Computer simulation of chemotaxis in caenorhabditis elegans in consideration of whole-body movements"*, Intelligent Systems Conference (IntelliSys), SAI, pp. 651-656, London 2015.

[6] B. Gramescu, C. Nitu and N. Alexandrescu. *"Modeling of a Mobile Robot with Worm-like Movement"*, The International Conference on "Computer as a Tool", EUROCON, pp. 1204-1207, Belgrade 2005.

[7] M. R. S. Noorani, A. Ghanbari and S. Aghli. *"Design and fabrication of a worm robot prototype"*, 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM), pp. 073-078, Tehran 2015.

[8] W. Wang, Y. Wang, J. Qi, H. Zhang and J. Zhang. *"The CPG control algorithm for a climbing worm robot"*, 3rd Conference on Industrial Electronics and Applications, IEEE, pp. 675-679, Singapore 2008.

[9] Ch. Song, D. Lee, S. Lee. *"Bioinspired Segment Robot with Earthworm-like Plane Locomotion"*, *Trends in Biotechnology,* Vol. 31, 5, pp. 292-302 2013.

[10] K. Sangbae, C. Laschi, B. Trimmer. *"Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics"*, *Journal of Bionic Engineering,* Vol. 13, 2, pp. 287-294 2016.

[11] X. Zhou, C. Majidi, O. O′Reilly. *"Flexing into motion: A locomotion mechanism for soft robots"*, *International Journal of Non-Linear Mechanics,* Vol. 74, pp. 7-17 2015.

[12] K. Pettersen. *"Snake robots"*, *Annual Reviews in Control,* Vol. 44, pp. 19-44 2017.

[13] P. Liljebäck, K.Y. Pettersen, Ø. Stavdahl, J.T. Gravdahl. *"A review on modelling, implementation, and control of snake robots"*, *Robotics and Autonomous Systems,* Vol. 60, 1, pp. 29-40 2012.

[14] X. Dong, M. Raffles, S. Cobos-Guzman, D. Axinte, J. Kell. *"Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints"*, *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 77, pp. 73-91 2014.

[15] Murata S. y KurokawaH. "*Self-Reconfigurable Robot*". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1). 71–78. 2007.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 2, pp. 15-27.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sistema de Posicionamiento Global Utilizando PIC1F877 y el Módulo GPS PAM-7Q

Martinez Chavez Gustavo Adolfo [1]
[1]EMI-UPT.

Resumen

El presente trabajo muestra la experiencia en la búsqueda de una solución tecnológica y económica más adecuada que permitiera la implementación de un sistema portable de posicionamiento terrestre ó sistema GPS OEM y el tratamiento necesario sobre las cadenas de datos entrada que por este con su respectiva interpretación básica. Para ello se utilizo el modulo Parallax GPS Receiver Module el cual tiene una resolución de ±5m es decir 10 metros, utiliza comunicación UART y un Microntrolador PIC16F876, lo que ha permitido obtener una sencilla implementación, sumándole el atributo que es económicamente mas bajo respecto con otros módulos integrados GPS existentes en el mercado nacional.

Palabras clave: GPS, Internet, Satélites GEO, PIC Microcontrolador.

1. Introducción

Durante la realización del presente trabajo se concibió el objetivo de poder implementar unos sistemas portable de geolocalización con componentes electrónicos existentes en el mercado nacional para obtener la ubicación geográfica real de un objeto.

Para lo cual se establece un mayor énfasis en la determinación de una posición significativa; en dicho proceso generalmente se emplean sistemas de información geográfica, concebidos como un conjunto organizado de hardware y software, y datos geográficos, que se encuentra diseñados especialmente para capturar, almacenar, manipular y analizar en todas sus posibles formas la información geográfica referenciada, partiendo del uso de un modulo **GPS** económico y fácil de usar; el cual puede ser utilizado como parte de un sistema de **cartografía digital.**

Durante las décadas de 1950 el satélite espacial Estadounidense Vanguard1 [1]mostró que era posible la transmisión de señales de radio desde el espacio para orientarse y situarse en la superficie terrestre. Puso en funcionamiento un sistema de localización por satélite en la década de los noventas, hoy conocido por sus siglas en inglés GPS Sistema de Posicionamiento Globa (*Global Positioning System)*.

1.1. Funcionamiento General del Sistema GPS.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) requiere de una red de computadoras y un grupo más de 24 para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud de un objeto sobre la superficie de la tierra. El sistema de posicionamiento Global GPS mide el tiempo (T) que tarda la señal en llegarle. La distancia (**x**) entre el satélite y un punto sobre la tierra, resulta de la multiplicación la rapidez (**v**) de la señal de radio por el tiempo que tarda en llegar esta al receptor. La ecuación 1 muestra la relación cinemática básica que permite la determinación de la distancia.

$$X = V. T \qquad (1)$$

Ecuación 1. Movimiento con rapidez constante.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Como el GPS mide señales de radio, la rapidez que se emplea es constante y su valor corresponde al de la luz, es decir, aproximadamente 300.000 km/s. De esta forma el cálculo se reduce a conocer la duración (T) que toma la onda de radio en llegar al receptor GPS. Este cálculo lleva consigo algunas dificultades ya que, entre otros, el tiempo de viaje de la onda es muy pequeño. Cuando la señal procedente del satélite llega al receptor, esta arriba con un desfase como debido a la distancia y el tiempo que tarda.

El receptor GPS sólo tiene que medir este desfase, y una vez ha calculado lo multiplica por la rapidez de la luz. Para poder medir el desfase de la señal de radio se requiere que los relojes de los sistemas satelitales y de los módulos receptores se encuentren debidamente sincronizados, pues que deben generar de manera simultánea el mismo código que lleva en la señal satelital. Por otro lado se sabe que mientras los relojes internos de los satélites atómicos y bastante exactos, los localizados en los módulos receptores son simples osciladores de cuarzo. Las distancias medidas con errores causados por el sincronismo se denominan pseudo distancias, pero se hace necesario, como mínimo, cuatro satélites para estimar correctamente la posición. [3].

En la Figura 1 se ilustra la configuración básica del sistema GPS. Por otro lado, en el cálculo de las pseudo distancias hay que considerar que las señales que llegan al receptor GPS son muy débiles y se hallan rodeadas de ruido electromagnético de otras fuentes. En cada instante un satélite envía una señal con un patrón igual al de la serie pseudo-aleatoria que se genera en el receptor.

El receptor calcula la distancia efectuando un desplazamiento temporal del código pseudo-aleatorio hasta lograr una coincidencia con el código recibido desde el satélite; siendo este el tiempo de vuelo de la señal. Este proceso se lleva a cabo de forma automática y continua en el receptor.

Al público en general sólo se le permite el uso de un subconjunto degradado de señales GPS, sin embargo la comunidad civil ha encontrado alternativas mediante las denominadas técnicas diferenciales logrando obtener una excelente exactitud en la localización global. Gracias a esto las aplicaciones civiles presentan un importante crecimiento. [3].

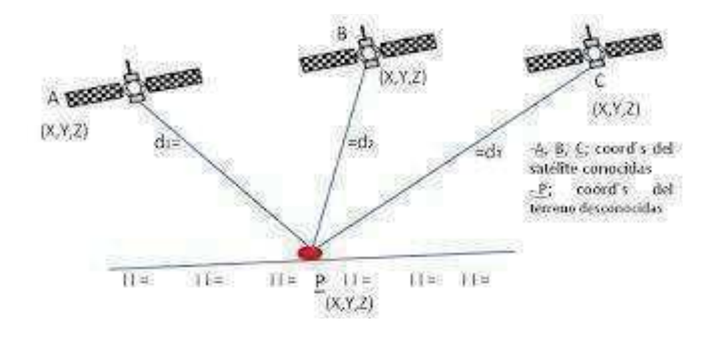


Figura 1. Sistema Básico de triangulación GPS.

1.2. Fuentes de error del GPS.

A continuación se describen las fuentes de error que en la actualidad afectan de forma significativa a las medidas realizadas con el GPS[1]:

1.2.1. Perturbación Ionosférica. Las partículas cargadas eléctricamente de la ionosfera alteran la rapidez de las señales de radio. Este fenómeno puede agregar un error de ± 5m.

1.2.2. Fenómenos Meteorológicos. En la troposfera el vapor de agua afecta a las señales de

ISBN: 978-607-9394-14-1.



las ondas electromagnéticas disminuyendo también su rapidez. Los errores causados son similares, en magnitud, a los generados por la ionosfera, pero su corrección es casi imposible.

1.2.3. Imprecisión en los Relojes. Los relojes atómicos de los satélites y los de cuarzo de los receptores presentan leves desviaciones pese a su riguroso ajuste y control. Esta imprecisión puede introducir un error adicional de ±2m.

1.2.4. Interferencias Eléctricas Imprevistas. Las interferencias electromagnéticas pueden causar correlaciones erróneas de los códigos. Estas interferencias causan errores de hasta un metro.

1.2.5. Error Multisenda. Las señales transmitidas desde los satélites pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el receptor. Los receptores modernos emplean técnicas avanzadas de proceso de señal y antenas de diseño especial para minimizar este error, que resulta muy difícil de modelar al ser dependiente del entorno donde se ubique la antena GPS.

1.3. Interferencia "Disponibilidad Selectiva S/A". Esta es la principal fuente de error del sistema GPS y es introducida deliberadamente por militar administrador de los satélites.

1.4. Topología Receptor-Satélites. Los receptores deben tener en cuenta la forma en que están dispuestos los satélites y el módulo receptor respecto a estos. Una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la exactitud de una medida. Los errores procedentes de las distintas fuentes satelitales se acumulan en un valor de asociado a cada medida de posición GPS [1].

2. Metodología

Para el diseño del sistema de posicionamiento, se tuvieron en cuenta las siguientes características: bajo costo, ergonomía, facilidad de uso y eficiencia, el diagrama de bloques del sistema electrónico se ilustra en la Figura 2 en este se muestra las partes constitutivas más generales del sistema desarrollado.

El PAM-7Q de Parallax es un módulo sumamente integrado de GPS, RF y antena adecuado para la banda L1 de GPS y los sistemas A-GPS. El dispositivo se basa en la misma arquitectura GPS SiRFstarIV utilizada en el Retrievor, combinada con tecnología de alta eficiencia de antena de Antenova, y está diseñado para proporcionar patrones óptimos de radiación para la recepción de GPS.

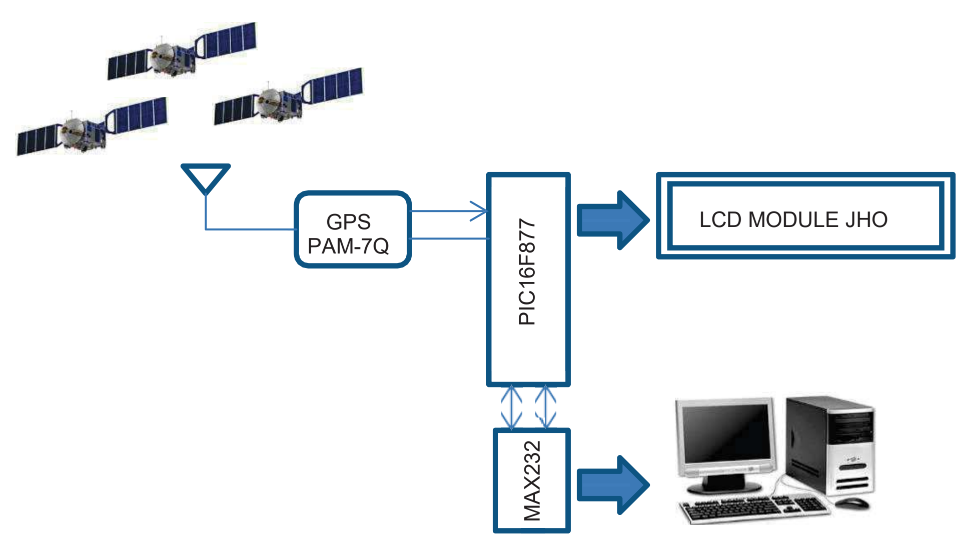


Figura 2. Diagrama de bloques del módulo GPS PAM-7Q.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1. El módulo GPS PAM-7Q de Parallax's

El módulo GPS PAM-7Q Module de la compañía Parallax's que basa su funcionamiento en la tecnología de circuitos integrados de alta sensibilidad diseñados para la implementación de los sistemas de posicionamiento global.

El módulo GPS PAM-7Q es diseñado especialmente bajo el modelo OEM3, lo que permite que, de manera flexible, se implementen nuevos desarrollos integrados sobre esta tecnología. El módulo GPS PAM-7Q contiene LNA, un filtro SAW4, Reset IC, RTC X-tal, TCXO y regulación. Además incorpora un led para indicar posición o el estado del módulo GPS. En la Figura 3 se muestra una imagen del módulo GPS PAM-7Q de la compañía de Parallax's [2].



Figura 3. PAM-7Q de la compañía de Parallax's [2].

2.2. Características del modulo GPS PAM-7Q

- Tasa máxima de muestreo de 1 Hz Tipo dereceptor:
- Tiene una exactitud menor de ±5 metros.
- Tiempo de inicio: en frío 60s, en tibio 38s y en caliente 8s.
- Protocolo NMEA 0183 con cadenas de mensajes: GLL, GGA, RMC, VTG, GSV, GSA.
- Es un sistema completo auto contenido de reducido espacio ypeso.
- Sus dimensiones son 70.15mm x 40.6mm x 14.1mm
- Interfaces de datos serie a RS-232 (CMOS 3.3 Volts)
- Fuente de Alimentación no regulada de 3.8 a 6.5 voltios DC
- Está completamente blindado
- Amplificador de bajo ruido
- Posee un oscilador de cuarzo de temperatura controlada
- Maneja un reloj de tiempo real de 32.768 KHz

2.3. Comunicación de los datos

El sistema GPS posee un canal de entrada serial RXA y otro de salida TXA para su configuración. De acuerdo al sistema de datos seleccionado, se debe elegir la tasa de datos (Baud Rate) a usarse en el sistema.

El módulo maneja por defecto una configuración de 9600 Bps para una salida NMEA[5]. NMEA 0183, mejor conocida simplemente como NMEA de forma abreviada, es una especificación combinada eléctrica y de datos entre aparatos electrónicos marinos y receptores GPS.

Ha sido definido, y está controlado, por la organización Estadounidense National Marine Electronics Association de la cual se derivan sus siglas. Este trabajo usa el protocolo NMEA para todos sus efectos, por lo que se requiere una ampliación pertinente [2].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Tasa máxima de baudios por protocolo.

(Bps)	Comentarios
1200	NMEA, adecuado para el mensaje RMC únicamente
2400	NMEA, adecuado para el mensaje RMC únicamente
4800	Debe desactivar algunos mensajes para evitar el cuello de botella de la comunicación y la pérdida de información, por ejemplo, NMEA: RMC y ZDA.
9600	Velocidad de transmisión mínima recomendada para la salida NMEA en configuración estándar
19200	Velocidad de transmisión mínima recomendada para la salida de protocolo binario de SiRF
38400	Velocidad de transmisión mínima recomendada para la salida de protocolo binario SiRF incluidos los datos de desarrollo y los datos de seguimiento primarios.
57600	Velocidad de transmisión mínima recomendada para la salida de protocolo binario SiRF incluidos los datos de desarrollo y los datos de seguimiento primarios.

2.4. Protocolo NMEA (NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION).

Cada fabricante de GPS posee un formato propietario para la entrega de la información al usuario mediante un puerto de comunicación tipo serial (actualmente Bluetooth y USB), pero tradicionalmente mediante el protocolo RS-232C a 4800 Bps. Se ha estandarizado un formato de intercambio dentro de los entandares NMEA, el protocolo NMEA-0183; el cual consiste de una serie de información formateada, separadas en sentencias llamadas tramas. Entre ellas $GPXTE,

$GPBWC, $GPVTG, $GPRMC, $GPRMB, $GPRxx, $GPWPL, $GPGLL, y $GPRMZ. Entre estas,

la trama $GPRMC (Recommended minimum specific GPS/Transit data), es la más completa referente a la posición geográfica.

El protocolo NMEA es utilizado por una diversidad de sistemas de posicionamiento y navegación entre ellos el LORAM, OMEGA Navigation receiver, GPS, etc. Por ello todas las tramas identifican al inicio el sistema al cual pertenecen, $GP (en caso del GPS) y seguidamente identifican el tipo de trama y luego el resto de los parámetros separado por comas.

El protocolo NEMEA-0183 está compuesto de varias tramas separadas por un carácter CR (Carriage Return) y un LF (Line Feed). Lo que obliga a leer todos los encabezados y discriminar del conjunto la trama de nuestro interés, mediante la Identificación de los caracteres iníciales; en nuestro caso $GPRMC. Los parámetros contenidos en las tramas NEMEA-0183, no tienen longitud fijas y están separados por comas; en algunas condiciones pueden faltar ciertos campos pero las comas marcan los límites de éstos aunque no contengan información. Antes del CR de finalización de trama, se coloca un asterisco seguido de dos dígitos hexadecimales que representan un “checksum”; la OR exclusiva de 8 bits de todos los caracteres que conforma la trama (sin incluir los símbolos $ y *). El análisis de las comas en la trama $GPRMC, permite aislar las coordenadas geográficas y los otros parámetros pertenecientes a dicha trama. En la Tabla 2 se detallan estos parámetros y se muestran ejemplos de la trama $GPRMC.

La mayoría de los propósitos puede considerarlo RS-232 compatible. Todos los datos son trasmitidos a través de sentencias con carácteres ASCII, cada sentencia comienza con “$” y termina con <CR><LF> (CR: Carriage Retun, LF: Line Feed).

Los primeros dos caracteres después de “$” son los que identifican el equipo, y los siguientes tres caracteres son el identificador del tipo de sentencia que se está enviando. Los tres tipos de sentencias NMEA que existen son los de envío (Talker Sentences), Origen del equipo (Proprietary Sentences) y consulta (Query Sentences).

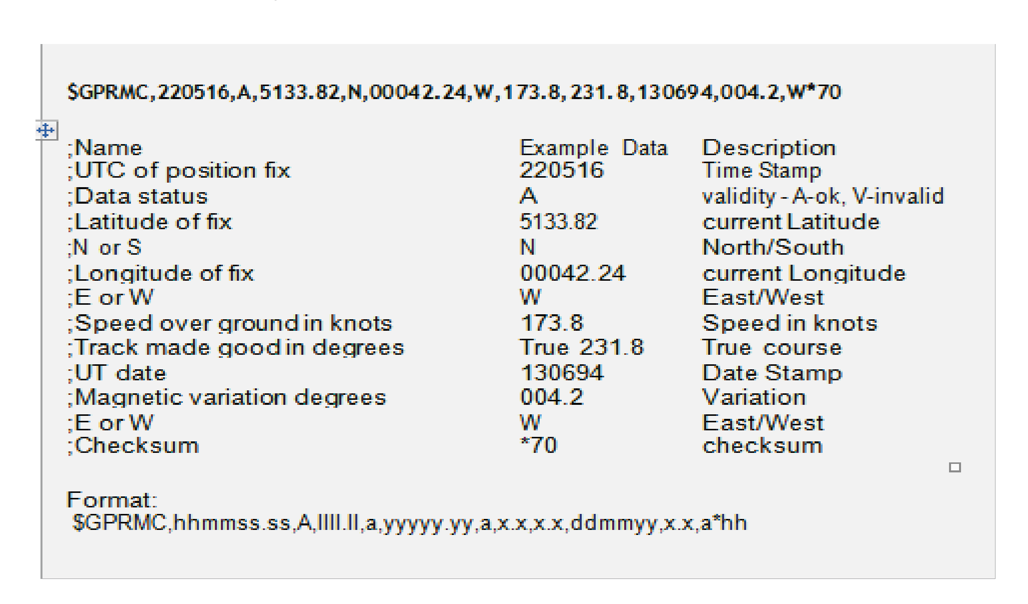
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los datos están separados por comas y deben incluirse todas, ya que actúan como marcas. Opcionalmente se agregada una suma de verificación adicional; Algunas de las señales de comunicaciones que generalmente utilizan un protocolo NMEA son:

- GPS
- Compás magnético
- Radar o Radar ARPA
- Ecosonda, profundidad
- Sensores de rapidez, magnéticos, dopler o mecánicos
- Instrumentosmeteorológicos
- Transductores
- Reloj atómico, cuarzo, cronómetro
- Sistemas de navegación integrados
- Comunicaciones satelitales o de radio.

Tabla 2. Trama $GPRMC recomendaciones minias del GPS/Transit data.



$GPRMC,220516,A,5133.82,N,00042.24,W,173.8,231.8,130694,004.2,W*70

;Name	Example Data	Description
;UTC of position fix	220516	Time Stamp
;Data status	A	validity - A-ok, V-invalid
;Latitude of fix	5133.82	current Latitude
;N or S	N	North/South
;Longitude of fix	00042.24	current Longitude
;E or W	W	East/West
;Speed over ground in knots	173.8	Speed in knots
;Track made good in degrees	True 231.8	True course
;UT date	130694	Date Stamp
;Magnetic variation degrees	004.2	Variation
;E or W	W	East/West
;Checksum	*70	checksum

Format:
$GPRMC,hhmmss.ss,A,llll.ll,a,yyyyy.yy,a,x.x,x.x,ddmmyy,x.x,a*hh

3. Resultados.

El sistema GPS, en su modalidad OEM, puede integrase de manera relativamente simple, para ello se ha utilizado el Microcontrolador PIC16F877.

3.1. Conexión del Microcontrolador PIC16F877

El Microcontrolador PIC16F877 que es un Microcontrolador con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa gran facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no se requiere borrarlo con luz ultravioleta como las versiones EPROM, sino que permite reprogramarlo nuevamente sin ser borrado con anterioridad; El PIC16F877 es un Microcontrolador de Microchip Technology fabricado en tecnología CMOS, su consumo de potencia es muy bajo y además es completamente estático, esto quiere decir que el reloj puede detenerse y los datos de la memoria no se pierden.

El encapsulado más común para este Microcontrolador es el DIP (Dual In-line Pin) de 40 pines, propio para usarlo en experimentación. La referencia completa es PIC16F877-04 para el dispositivo que utiliza cristal oscilador de hasta 4 MHz, PIC16F877-20 para el dispositivo que utiliza

ISBN: 978-607-9394-14-1.



cristal oscilador de hasta 20 MHz.

Tomando en cuenta estas observaciones que se describieron en el párrafo anterior: al igual que la aunada a las funciones propias de Microntrolador PIC, nos permitió la integración de una interface física robusta y funcional, cuyas funciones utilizadas se describen de manera general en el siguiente Tabla 3 y Figura 4.

Tabla 3. Disposición de pines de la interface del GPS.

Nombre	Descripción	Tipo
VDC	Entrada de Voltaje 3.8V ~ 6.5V	Entrada
VDC	(En cortocircuito con el pin 2)	Entrada
Reset	Restablecer entrada (activo	Entrada
TIME	Tiempo 1pps	Entrada salida
GND	Tierra	
TXA	Salida de datos Datos GPS	Salida
RXA	Una serie de datos de entrada	Input

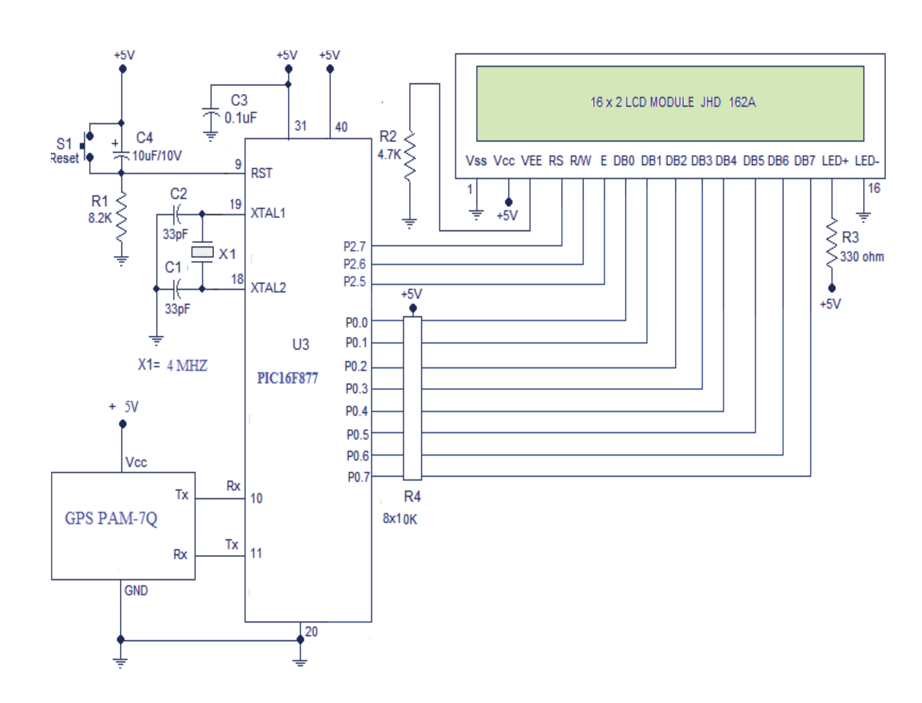


Figura 4. Interface PIC16F877 y modulo PAM-7Q de la compañía de Parallax's.

3.2. Conexión serial de TTL para PC.

El MAX232 es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa. Este solamente necesita una alimentación de 5V, ya que internamente genera las tensiones necesarias para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V. En la Figura 5, en su parte (a), se muestra la posible adaptación del módulo GPS al computador personal haciendo uso del circuito integrado MAX232. y en su parte (b) muestra los pines del GPS [4].



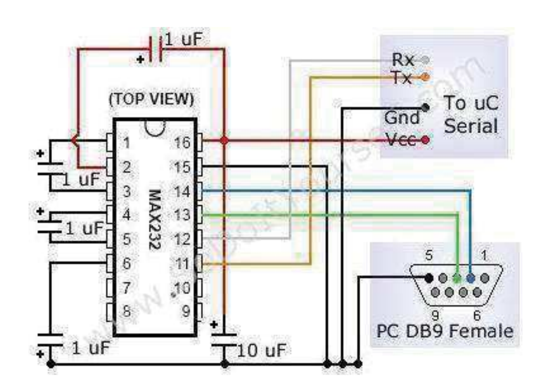


Figura 5. Conexión del módulo GPS a la PC a través del CI MAX 232.

El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL.

Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie de la PC, que son TX, RX, RTS y CTS.

TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos [2][4] .

3.3. Descripción del algoritmo de control.

El algoritmo de control se implementó en el lenguaje de programación C mediante el uso del compilador PIC C Compiler que es un compilador C que contienen operadores estándar del lenguaje C y funciones incorporados en bibliotecas que son específicas a los registros de PIC, proporcionando las funciones del dispositivo de alto nivel, que es utilizado por los compiladores de las tarjetas de desarrollo marca Microchip. Este entorno tiene disponible múltiples bibliotecas de código abierto, lo que facilita y acelera los desarrollos basados en esta plataforma. Este algoritmo es el encargado de controlar todos los procesos necesarios para llevar a cabo la adquisición, el registro, la captura y la comunicación vía serial á una computadora personal.

En cuanto a su estructura, el algoritmo se inicia con la configuración del hardware mediante la definición de bibliotecas propias para el Modulo GPS PAM-7Q utilizando, declaraciones de clases, variables globales, constantes y la habilitación de todos los protocolos de comunicación con sus respectivas velocidades. Seguidamente, se realiza el proceso de adquisición de datos, mediante lecturas de los módulos de hardware. Por último, se registra y almacena la información y se envía mediante el puerto serie a una computadora personal. En la Figura 6 se muestran los diagramas de flujo del código de inicialización y adquisición. Un mayor detalle de la programación se puede encontrar en el apartado 3.4.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



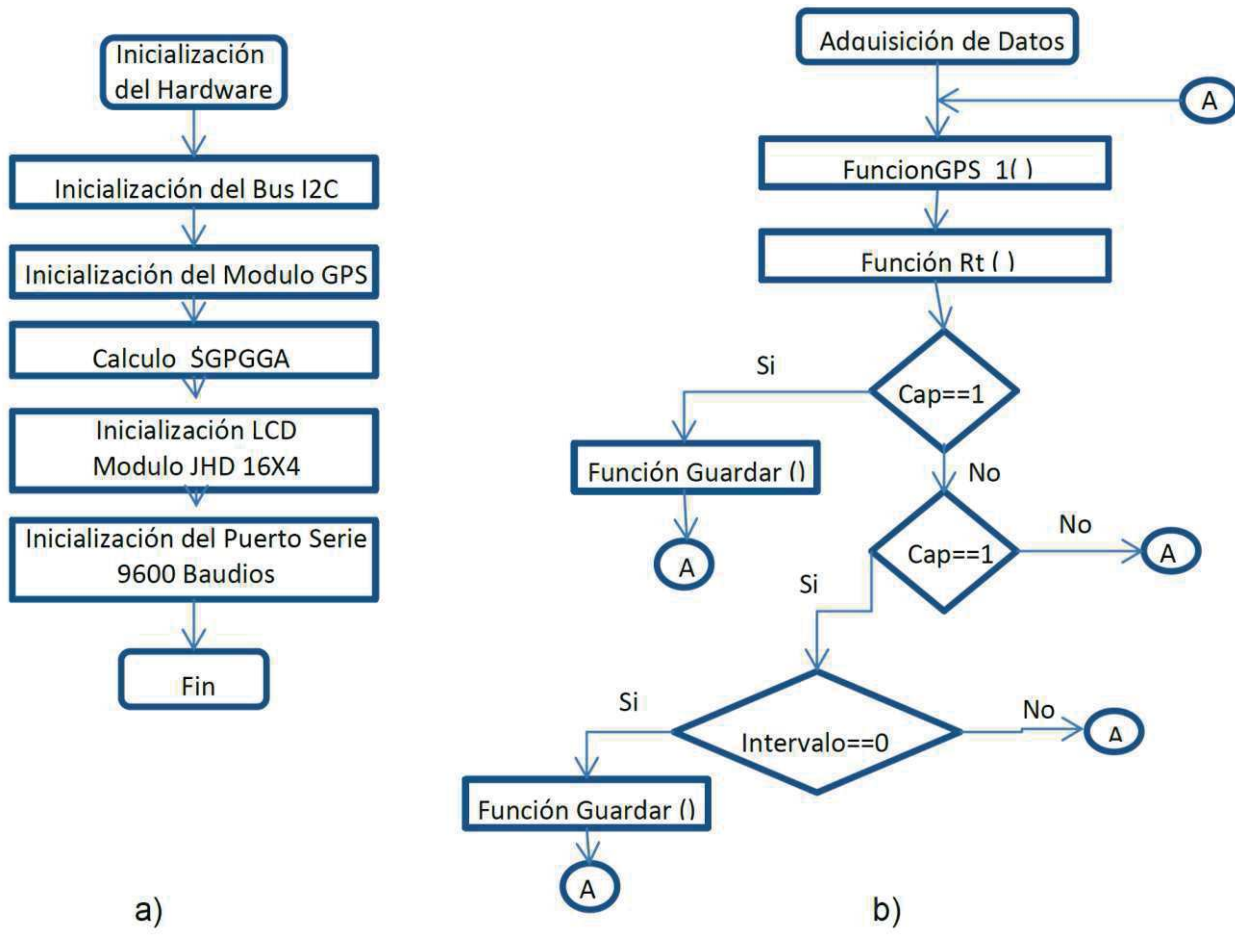


Figura 6. a) Diagrama de flujo para el algoritmo de inicialización del hardware. b) Diagrama de flujo para el algoritmo de adquisición de datos.

3.1. Tratamiento de la cadena $GPGGA.

Para capturar la cadena $GPGGA se diseñó una función en el código de Microntrolador usando las herramientas de programación en lenguaje C.

El código mostrado en la Figura.5. Ilustra la función que obtiene los datos e la cadena $GPGGA.

3.1.1. Encabezados.

```
// RXCODE // Código para el PIC Rx para el DMR // Realiza la función Recolección de Datos y Control del
Equipo
.////TRAMA DE DATOS//$DMR,ACKT,TIPO_DATA_GPS,PERIODO_DE_ENVIO,ON/ OFF,
 ////ACK: VALOR DE RENVIO CORRECTO DE DATOS
//0x01: ENVIO CORRECTO
//0x00: ENVIO INCORRECTO //TIPO_GPS: TIPO DE DATO GPS ENVIADO
 // 0x00 : GPGGA
 // 0x01 : GPGGA
 // 0x10 : GPGSA
// 0x11 : GPRMC //PERIODO_DE_ENVIO: PERIODO EN EL CUAL SE ENVIA CADA DATO
// 0x00: 1 MINS
 // 0x01: 5 MINS
 // 0x10: 10 MINS
```

ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
// 0x11: 15 MINS
 //ON/OFF:DATO PARA INDICAR EL VALOR DE ON/OFF
 // 0x01: PRENDIDO
// 0x00: APAGADO
 // EJEMPLO DE TRAMA
 // $DRM,0,0,0,1,0X0D
 // ACK=0;TIPO_DE_DATO=GGA; TIEMPO=1min; ESTADO=Prendido //

#include <16F877A.h>
#FUSES NOWDT
//No Watch Dog Timer
 #FUSES HS
//High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPUT
//No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT
//Code not protected from reading
#FUSES NODEBUG
//No Debug mode for ICD #FUSES NOBROWNOUT
//Reset when brownout detected
#FUSES NOLVP//Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18) #FUSES NOCPD
//No EE protection #FUSES NOWRT
//Program memory not write protected
#use delay(clock=40000000) //Velocidad del Oscilador Externo #use
rs232(baud=4800,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
//Configuracion del RS232
#use fast_io(B) #use fast_io(C) #use fast_io(A) //Declaración de Librerías
#include <ctype.h> #include <stdio.h> #include <stdlib.h> #include
<string.h>
```

3.1.2. Definición de Puertos.

```
 //DEFINICION DE LOS PUERTOS A USAR #DEFINE LEDTX PIN_C4 #DEFINE LEDRX PIN_C5 #DEFINE
PACK PIN_B1 #DEFINE PTIPOGPSH PIN_B2 #DEFINE PTIPOGPSL PIN_B3 #DEFINE PTENVIOH
PIN_B4 #DEFINE PTENVIOL PIN_B5 #DEFINE PESTADO PIN_B6 #DEFINE INENVIAR PIN_A3 #DEFINE
ANTENA PIN_A2 #DEFINE ONPIC PIN_A1 #DEFINE FLAGACKPIN_A0
// CONSTANTES
//////////////////////////////////////////////////////////////////////
int const lentrama=30; int const lenhead=4;
// VARIABLES EN RAM ////////////////////////////////////////////////////////////
int xbuff=0x00; // Indice: siguiente char en cbuff int xhead=0x00; char
rcvchar=0x00; // último caracter recibido int1 flag1=0; // Flag para indicar segundo inicio de comando int1
flag2=0;int1 endtrama=0; // Flag para indicar el fin de trama int1 varON=0;char cabezera[lenhead];
// ESTRUCTURA DEL LA TRAMA
 ////////////////////////////////////////// struct datos{ char start; char header[lenhead]; char dato[lentrama]; char end;
};struct datos trama;
```

3.1.3. Funciones.

```
FUNCIONES
///////////////////////////////////////////////////////////// void enviartrama(void); void inicbuff(void);
void addcbuff(char c); // añade caracter recibido al buffer void inictrama(void); void inicflags(void); void
procesa_comando(void); void control_inicio(void); //
INTERRUPCIONES //////////////////////////////////////////////////////////////////
#int_RDA void serial_isr() { // Interrupción recepción serie USART rcvchar=0x00;          //
Inicializo caracter recibido
if(kbhit()){ // Si hay algo pendiente de recibir ... rcvchar=getc();
// lo descargo y ... addcbuff(rcvchar); // lo añado al buffer y ...
}}
// AÑADE EN EL BUFFER DATOS ENTRANTES SENGUN
TRAMA
//////
void addcbuff(char c) { int i=0; if(flag1==0)if (c==0x24)// Detecta si el comienzo de trama ed $ {
```

ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
for(i=0;i<=lenhead;i++)
        trama.header[i]=0x00; Limpia el buffer de basura. flag1=1;} else
       flag1=0;          else { if(flag2)
    {
     trama.dato[xbuff++]=c; // Añade al bufferif (c==0x0D)
// Detecta si es fin de trama
    { trama.dato[xbuff-1]=0x00; // OUTPUT_LOW(LEDRX); endtrama=1; // Bandera de fin de trama
        flag1=0;flag2=0;}
        else { trama.header[xhead++]=c; // Añade a buffer de cabecera
}}
```

3.1.4. Función para la obtención de la cadena $GPGGA.

```
// LA FUNCIÓN QUE OBTIENE LOS DATOS DE LA CADENA
$GPGGA. ////////////////////////////
Dim cadx, GPGGA As String Dim d As Integer
Dim v(), z() As String Dim wfecha As String
Dim wHora, wLatiCardinal, wLongiCardinal Dim wAltUM, clatitud, clongitud As String Dim
wLatitud, wLongitud, wAltitud As Double v = Split(Cad_GPS, Chr(13))
For d = 2 To v.Length - 2 cadx = v(d)
cadx = Replace(cadx, Chr(13), "") GPGGA = Mid(cadx, 2, 6)
If GPGGA = "$GPGGA" Then z = cadx.Split(",") wLatitud =
z(2) wLatiCardinal = z(3) wLongitud = z(4) wLongiCardin al =
z(5) wAltitud = z(9) wAltUM = z(10)
wAltitud = Math.Round(wAltitud)
If wLatitud <> 0 Or wLongitud <> 0 Or wLatitud <> 0 Then wLatitud = gradosNMEA_gradosDec(wLatitud)
clatitud = GradosDec_Grados(wLatitud) wLongitud = gradosNMEA_gradosDec(wLongitud)
clongitud = GradosDec_Grados(wLongitud) wAltitud = Math.Round(wAltitud)
cad_GPGGA = clatitud & " " & wLatiCardinal & ";" & clongitud & _
 " " & wLongiCardinal & ";" & wAltitud & " " & wAltUM Else cad_GPGGA = w_xlatitud & ";" & w_xlongitud
& ";" & w_xaltitud
End If End If
Next
cad_GPGGA = w_xlatitud & ";" & w_xlongitud & ";" & w_xaltitud wfecha =
lectura_fecha(Trim(DateString())) wHora =TimeString
Return (wfecha & ";" & wHora & ";" & cad_GPGGA) End Function.
```

3.2. Implementación y validación del sistema de adquisición de datos.

En este apartado se muestra la implementación física y la validación realizada al sistema de adquisición de datos, donde se evaluó la integración de todos los módulos descritos en la sección 2. En la Figura 7 se muestra el prototipo implementado del sistema de adquisición de datos.





Figura 7. Fotografía con los resultados en que se observa los datos obtenidos del modulo GPS.

3.3. Captura de datos desde el GPS.

Para iniciar la conexión con la interface física y el modulo GPS PAM-7Q, se utilizo el programa de la Hiperterminal de Windows XP. Su configuración es mínima ya que la mayoría de sus parámetros son de salida.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 2, pp. 15-27.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



El sistema genera a la salida las cadenas establecidas por la especificación del protocolo NMEA 0183. Estas, posteriormente, deben ser tratadas para su selección y filtrado de acuerdo a los requerimientos en este caso se procedió acorde a la recomendación, $GPGGA. En la Figura 8 se muestra las cadenas de caracteres que se obtienen del modulo GPS a la PC a través del puerto RS-232 por medio de la hipertermia de Windows XP.

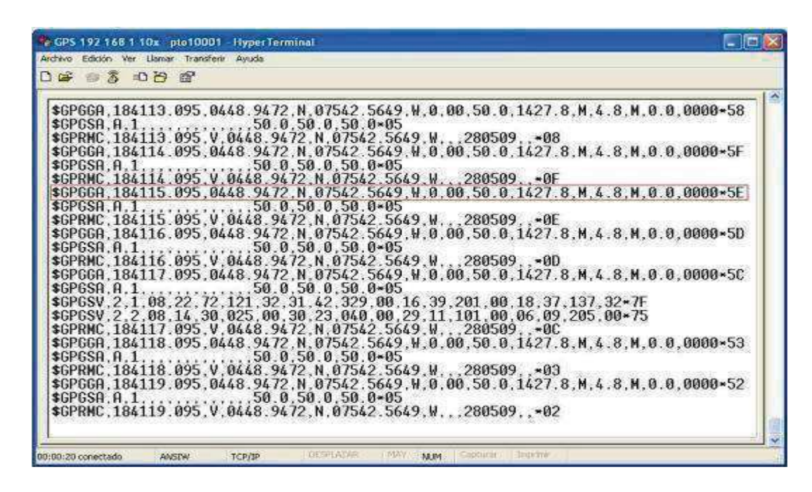


Figura 8. Muestra de datos por medio de la hiperterminal de Windows XP.

3.4. Pruebas de Operación del GPS.

Para evaluar el buen funcionamiento del equipo, se realiza un conjunto de pruebas desde el arranque del sistema, hasta la recepción y despliegue de las tramas, durante este proceso se evalúa su comportamiento.

Para ello se opera con el equipo encendido durante ocho días verificando su estado, los datos se presentan en la Tabla 4. Obteniéndose un resultado aproximado del 92% de confiabilidad, donde se puede concluir que el modulo es confiable en su operación.

Tabla 4. Estimación de Confiabilidad del sistema GPS.

OBSERVACIONES	CORRECTOS	FALLAS	EVENTOS TOTALES
Totales	125	11	136
Porcentaje	91.91%	8.09%	

4. Conclusiones

Se cumplió con los objetivos del proyecto, como fueron el diseño y la implementación para las distintas etapas que intervienen en la recepción de los datos del modulo GPS y la interfaz con el Microcontrolador. A través de este proyecto se puede apreciar la importancia que tiene la recepción de datos GPS para la localización geográfica destacando los siguientes puntos:

A. En la actualidad se tiene al alcance una gran cantidad de recursos tecnológicos cubriendo necesidades prioritarias, tal seria el caso de la localización de objetos y/o personas, para lo cual se utiliza el sistema de posicionamiento Global GPS.

B. El campo de aplicación de dicha tecnología es bastante amplio y extenso, ya que dicho sistema de posicionamiento podría ser utilizado para el control de aplicaciones robóticas y móviles, hasta

ISBN: 978-607-9394-14-1.



objetivos mas simples como ubicación de vehículo y algunos mas con fines deportivos; es por ello, que en el presente trabajo pretende ser una propuesta sobre el desarrollo e interacción de los datos de posicionamiento adquiridos mediante un receptor GPS, que recibe sentencias NMEA y que pueden ser de utilidad en combinación con otras tecnologías como microcontrolador y uso de sistemas de radiofrecuencia e internet.

C. Los sistemas de posicionamiento global GPS resultan en la actualidad de bajo costo y de fácil implementación mejorando las prestaciones de los equipos diseñados por los investigadores con unas pocas modificaciones.

D. A través de este proyecto se puede apreciar la importancia que tiene la recepción de datos de GPS para localización geográfica y permitir a cualquier entidad ya sea privada u pública aprovechar la disponibilidad de los datos.

E. El proyecto en su estado actual puede ser utilizado como un rastreador satelital de personas o vehículos, aprovechando la tecnología de punta que integra dicho modulo, es decir la miniaturización para crear equipos más pequeños y poder ser usados en áreas del cuerpo sin que sean pesados o muy grandes, al igual que vehículos que así lo requieran.

F. El proyecto abre la posibilidad de usar esta tecnología para otros fines como puede ser alarmas caseras GSM, proyectos de domótica y otros que conlleven, ya sea un GPS y/o un sistema GSM.

Referencias

[1].Pozo-Ruz-Universidad de Málaga, Sistema de posicionamiento global (gps): descripción, Análisis de errores, aplicaciones y futuro disponible en: http://www.iai.csic.es/ users/ gpa/ postscript.
[2].GPS Module GPS PAM-7Q disponible en: https://www.parallax.com/catalog/gps
[3].Glenn Baddeley - Global Positioning System, GPS - NMEA sentence information: http://aprs.gids.nl/ nmea/
[4].Texas [4].Instruments, MAX232 Drivers/Receivers disponible en: [4]http://focus.ti.com/ lit/ ds/ symlink/ max232.pdf.
[5]. Arriola Valverde, S.A. (2015). *Diseño de un Sistema de Adquisición de Datos para un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)*. Proyecto de Graduación. Cartago, C.R.: Tecnológico de Costa Rica.
[6]. Arriola Valverde, S.A. (2015a). *Manual de inicialización y software de un sistema de adquisición de datos* Cartago, C.R.: Tecnológico de Costa Rica.
[7].Arriola Valverde, S.A. (2015b). *Manual de software para de un sistema de adquisición de datos* Cartago, C.R.: Tecnológico de Costa Rica.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 28-36.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Estimación del Par de Contacto en un Dispositivo de Rehabilitación de Dedos de la Mano Utilizando una Analogía Corriente-Par

Zapatero Gutiérrez Araceli y Castillo Castañeda Eduardo

Instituto Politécnico Nacional, CICATA Unidad Querétaro

Resumen

Cuando un dispositivo controlado interactúa con otro sistema o dispositivo, existen fuerzas o pares de reacción producto del contacto entre ambos, los cuales son representativos del proceso de interacción y no deben ser omitidos de los análisis del dispositivo. La medición de las fuerzas o pares de contacto representa uno de los retos actuales en el control de interacción, en este artículo se propone utilizar una analogía corriente-par para modelar el proceso de interacción entre un dispositivo mecatrónico para la rehabilitación de dedos de la mano y un ser humano. Se realizó un experimento de cuatro etapas con 9 sujetos sanos para establecer esta analogía, a cada sujeto se le impuso una restricción de movimiento en su dedo índice y se midió el consumo de corriente en el motor; el modelo de comportamiento se evaluará como parte del trabajo futuro el cual involucra la etapa del desarrollo del control del dispositivo. Se obtuvo un conjunto de gráficas representativas del par de interacción donde se aprecia cómo el consumo de corriente y por consiguiente el par en el motor se incrementan conforme la restricción al movimiento en el dedo es mayor, cada gráfica es propia del sujeto evaluado por lo que los resultados modelan de forma individual el comportamiento del par.

Palabras clave: par de contacto, interacción paciente-máquina, analogía corriente-par, dispositivo de rehabilitación.

1. Introducción

Los dedos de la mano constituyen una parte fundamental del cuerpo humano, se realizan innumerables tareas a través de ellos por lo que no resulta sorprendente que las lesiones traumáticas de la mano ocupen los primeros lugares de incidencia en accidentes de trabajo [1]. El adecuado tratamiento de una lesión generalmente requiere de un proceso de rehabilitación que permita recuperar la funcionalidad perdida, en este sentido, la rehabilitación para los dedos de la mano se realiza de forma manual por terapeutas especializados, por lo que la atención está limitada solo a un pequeño número de pacientes.

El uso de sistemas robóticos para asistir en terapias de rehabilitación está en pleno desarrollo a comparación de otras aplicaciones de robótica, sin embargo ya ha probado ser seguro, factible y efectivo para asistir a la recuperación después de una lesión neurológica [2], además de reducir el tiempo de recuperación en un 30% [3]. Estos sistemas robóticos se clasifican según su interfaz con el ser humano, pudiendo ser de efector final o exoesqueletos. En los robots de efector final la interacción se lleva a cabo a través de un simple punto de contacto, en cambio en los exoesqueletos existen varios puntos de contacto puesto que se fijan sobre las extremidades humanas [2].

Para la estimación del par de contacto que se expone en este artículo se utilizó un dispositivo mecatrónico para la rehabilitación de dedos de la mano que se ubica dentro de la categoría de efector final, y el cual será descrito en la sección 2.2. Además del diseño mecánico y electrónico de este tipo

ISBN: 978-607-9394-14-1.



de sistemas, el diseño de un apropiado control de la interacción hombre-máquina es fundamental, y representa uno de los grandes retos a superar.

El control de la interacción involucra el control tanto de movimiento como de fuerza/par en los puntos de contacto entre usuario-dispositivo, y en el caso de los dispositivos de rehabilitación, el control debe asegurar que el sistema no le ocasione mayor daño al paciente.

El problema del control de la interacción consiste en la regulación de fuerzas y/o pares generados durante el desarrollo de una tarea en la cual el efector final de un robot tiene contacto físico con su entorno. La fuerza/par de contacto es la cantidad que describe el estado de interacción entre el robot y su entorno, por lo tanto es de esperarse que una mejora en el desempeño pueda lograse con un control de interacción provisto de mediciones de fuerza [4].

Una forma de medir la fuerza o par de contacto es a través de la medición directa utilizando un sensor de fuerza que vaya montado directamente sobre el efector final, sin embargo esto acarrea que la posición de cualquier cosa montada sobre el sensor de fuerza se convierta en incierta debido al acomodo del sensor [5], además se requiere la adopción de una acción estabilizante de control del error de fuerza debido a que las mediciones de fuerza suelen contener altos niveles de ruido. También es posible realizar la medición de fuerza de manera indirecta, regulándola a través del control de posición y/o velocidad [4]; lo que se propone en este artículo es modelar el par de contacto a través de la medición del consumo de corriente del dispositivo cuando se realiza la interacción con un sujeto sano.

En la sección 2 de este artículo se describe la fundamentación teórica que respalda la idea de utilizar el consumo de corriente para modelar el torque de contacto, se describe además el dispositivo utilizado y la forma cómo se realizaron los experimentos. La sección 3 corresponde a los resultados obtenidos y se muestran las curvas que modelan el proceso de interacción. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. Estimación del torque de interacción

Cuando se aborda el tema de dispositivos de rehabilitación es importante considerar que estos interactúan con personas de capacidades físicas limitadas, quienes necesitan realizar una serie de ejercicios repetitivos de manera segura para recuperar la funcionalidad perdida de alguna parte de su cuerpo.

Modelar las fuerzas de contacto representativas del proceso de interacción puede resultar una tarea compleja que requiere de una apropiada instrumentación, sin embargo eso aumenta la complejidad de los sistemas por las señales de control que se deben entonces considerar; cualquier dispositivo que se encuentre en contacto con su entorno producirá fuerzas de reacción que no deben ser omitidas pues forman parte del proceso de interacción, por lo tanto no debe tratarse al dispositivo como un ente aislado.

Los modelos son cruciales en el proceso de diseño de ingeniería debido a que pueden ser usados para la optimización de parámetros así como para predecir desempeños [6]. Para estimar un modelo del par de contacto propio del rehabilitador utilizado y el usuario, se utilizó una analogía corriente-par obtenida a través de una serie de experimentos que se describen en la sección 2.3. Se obtuvo un modelo de comportamiento que se utilizará en el desarrollo de la etapa de control del dispositivo.

Los sistemas análogos son aquellos que pueden representarse por los mismos modelos matemáticos, aunque físicamente sean diferentes. Todos los sistemas físicos se pueden traducir a circuitos electrónicos siempre que sus ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia sean idénticas. Las ecuaciones diferenciales de las que parten las analogías son aproximaciones de las características dinámicas de los sistemas físicos en cierta región de operación. Si la región operativa

ISBN: 978-607-9394-14-1.



de un sistema es muy extensa se puede subdividir en varias regiones y construir sistemas análogos para cada una de ellas [7].

Dentro de la literatura encontramos diferentes tipos de analogías, siendo una de las más comunes la que relaciona sistemas mecánicos con eléctricos, dentro de esta categoría encontramos relaciones fuerza/par-tensión y fuerza/par-corriente; en [6] por ejemplo, se utiliza una analogía electro-mecánica para modelar turbinas de viento de eje vertical tipo Darrieus, donde los autores modelan el flujo de aire a través del rotor como una fuente de corriente eléctrica.

También podemos encontrar aplicaciones de este tipo de analogía en el diseño y desarrollo de dispositivos piezoeléctricos [8] [9], debido a que éstos pueden trabajar como elementos eléctricos y mecánicos. En [10] se obtiene un modelo para predecir el comportamiento de un motor Stirling asumiendo que la presión es equivalente al voltaje y la taza de flujo a la corriente eléctrica, se propone un circuito eléctrico con comportamiento equivalente al del motor.

Determinar la analogía más apropiada entre circuitos eléctricos y sistemas mecánicos sigue siendo un tema de debate abierto [11], para la aplicación en particular que se presenta, se consideró más apropiado modelar el par de contacto a través de la medición del consumo de corriente en el motor debido que la medición involucra el acoplamiento con la transmisión, mecanismo y ser humano, además el consumo de corriente se relaciona directamente con el torque necesario para mover la carga. La justificación matemática de la analogía se presenta en la sección 2.1.

2.1 Analogía corriente-par

Un motor de CD involucra una ecuación eléctrica que modela el circuito eléctrico del inducido y una ecuación mecánica que modela el movimiento del rotor, la Figura 2.1 muestra el modelo de un motor de CD.

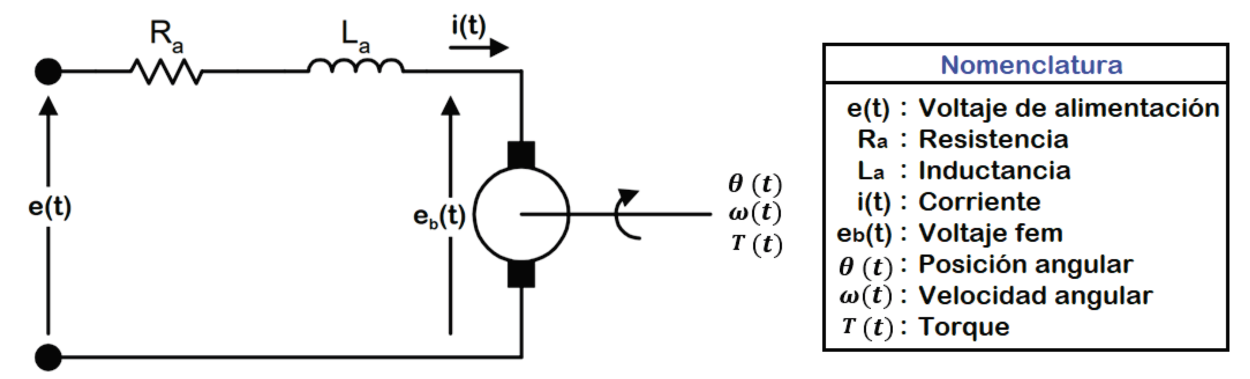


Figura 2.1. Modelo de un motor de CD.

Analizando la malla se obtienen las ecuaciones (1) a (4), donde (3) es la ecuación que relaciona directamente el torque con el valor de la corriente a través de la multiplicación de esta por la constante del par del motor, las gráficas de corriente que se obtuvieron de forma experimental y que serán presentadas en las siguientes secciones representan el consumo de corriente del motor CD utilizado.

$$e(t) = R_a\, i(t) + L_a \frac{di(t)}{dt} + e_b(t) \tag{1}$$

$$e_b(t) = k_b \frac{d\theta(t)}{dt} = k_b \omega(t) \tag{2}$$

$$T(t) = k_T\, i(t) \tag{3}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$T(t) = J\frac{d^2\theta(t)}{dt} + B\frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

Del conjunto de ecuaciones antes mostrado k_b y k_T son las constantes de la f.e.m. y par del motor respectivamente, mientras que *J* es la inercia del motor y *B* la constante de fricción del motor.

2.2 Descripción del dispositivo de rehabilitación de dedos de la mano

Se realizaron una serie de experimentos utilizando un dispositivo robótico auxiliar para asistir el movimiento de flexo-extensión de los dedos largos durante una terapia de rehabilitación de mano, este dispositivo tiene la característica que sigue una trayectoria elíptica que se asemeja al movimiento natural de los dedos [12]. Su diseño consta de una base fija de altura variable que sujeta el antebrazo, cuatro mecanismos tipo corredera–biela–manivela (RRRT) impulsados por motores de CD a través de un sistema de transmisión de husillo-tuerca, ver Figura 2.3 [13].

La interacción dispositivo-paciente representa el reto principal de la evaluación del dispositivo, en [14] pueden encontrarse el correspondiente análisis cinemático del dispositivo y el diseño de un control de trayectoria que funciona adecuadamente hasta cierto valor de par de contacto, sin embargo en esta primera aproximación se trató el problema de la interacción como una perturbación de magnitud constante y ajena al sistema, para tratar de modelar el par de la interacción en forma dinámica y relacionado con la cinemática y dinámica del sistema, se utilizó la analogía corriente-par, midiendo la corriente consumida por el dispositivo cuando interactúa con un sujeto sano. La descripción del experimento realizado se encuentra a detalle en la siguiente sección.

Para los experimentos se utilizó un solo mecanismo, correspondiente al movimiento de un dedo, y para obtener las gráficas correspondientes al consumo de corriente se utilizó la plataforma de Labview en conjunto con la tarjeta de control del sistema.

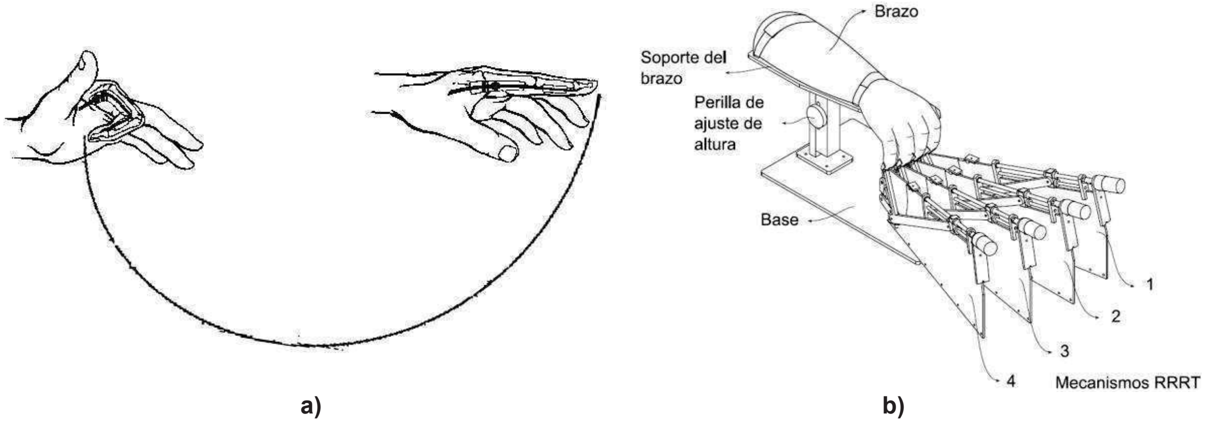


Figura 2.3. a) Trayectoria de flexo-extensión de un dedo. b) Dispositivo mecatrónico auxiliar para la rehabilitación de los dedos de mano.

2.3 Descripción del experimento

El experimento se realizó con 9 sujetos, entre hombres y mujeres con edades de 25-40 años, todos ellos sin condición de lesión o atrofia en las falanges. A cada sujeto se le realizaron cuatro pruebas con una serie de tres repeticiones.

La primera prueba consistió en atar el extremo del dedo índice de cada sujeto al dedal del dispositivo, ver Figura 2.4, y medir el consumo de corriente al realizar el movimiento de flexo-

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 28-36.
ISBN: 978-607-9394-14-1.

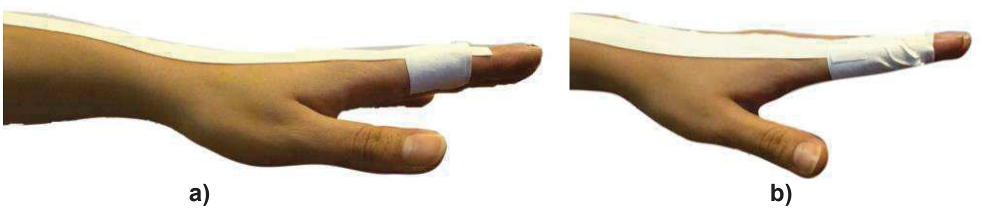


extensión, con esta medición se obtuvo la línea de referencia del consumo de corriente para cada sujeto.

Para las pruebas posteriores se simuló una condición diferente de atrofia en el dedo del sujeto sano; para la segunda se restringió el movimiento de la articulación proximal interfalángica (API) utilizando tela adhesiva transpirable, tal como se muestra en la Figura 2.5 a), y se midió el consumo de corriente al realizar el movimiento de flexión. Para la tercera prueba se restringió además de la API, el movimiento de la articulación distal interfalángica (ADI), ver Figura 2.5 b), y se midió el consumo de corriente al realizar el movimiento de flexión.



Figura 2.4. Dedo atado al dedal del dispositivo.



a) b)

Figura 2.5. a) Restricción del movimiento de flexión en la articulación proximal interfalángica (API). b) Restricción del movimiento de flexión en la articulación distal interfalángica (ADI).

Finalmente para la última prueba se restringió el movimiento de la API y se midió el consumo de corriente al realizar el movimiento de extensión, ver Figura 2.6. La Figura 2.7 muestra cómo el dedo quedó atado al mecanismo en las diferentes etapas del experimento. En la siguiente sección se mostrarán y discutirán los resultados.



Figura 2.6. Restricción del movimiento de extensión en la articulación distal interfalángica (API).

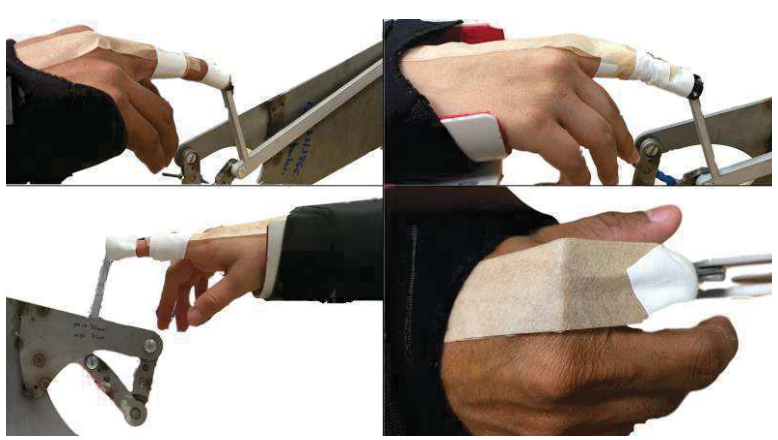


Figura 2.7. Experimentos realizados con sujetos y dispositivo.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 3, pp. 28-36.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

Los resultados de los experimentos se dividen por tipo de movimiento, flexión y extensión; para los resultados en el movimiento de flexión se tienen tres comportamientos, la Figura 3.1 a) corresponde a los resultados obtenidos para un sujeto que se usará para describir el comportamiento obtenido; la línea base, es decir, el dedo sin restricción de movimiento se muestra de color negro, la restricción en la API, denotada por R1, se muestra de color rojo y la restricción que incluye la ADI, denotada por R2, se muestra en color azul.

El primero pico de corriente corresponde al inicio del movimiento del motor, por lo que es considerado como consumo normal, obsérvese que al final de las gráficas se presentan diferencias en cuanto al consumo de corriente y es bastante notorio como incrementa el valor de la misma cuando se restringe el movimiento en la API y ADI. El procedimiento además se realizó con una persona que presenta una ligera limitación en el movimiento de sus falanges de la mano derecha, con su debido consentimiento se le practicó un experimento similar al que se les realizó a las personas sanas. Sus gráficas, ver Figura 3.1 b), ayudan a verificar cómo se produce el incremento en la corriente conforme le es más difícil al sujeto flexionar su dedo. En este caso en particular, la línea base de corriente se obtuvo a partir del movimiento de su mano izquierda, la cual no presenta ningún tipo de condición.

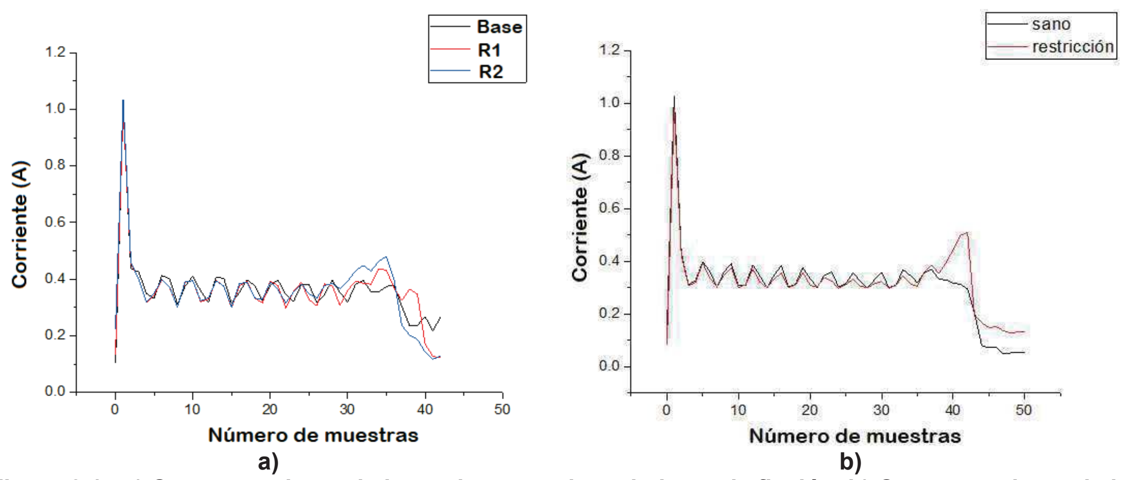


Figura 3.1. a) Comportamiento de la corriente en el movimiento de flexión. b) Comportamiento de la corriente para una persona con limitación real de movimiento.

Las gráficas obtenidas para cada sujeto presentan un comportamiento similar al de la Figura 3.1 a), corroborando así los resultados; en la Figura 3.2 se muestran algunas de estas gráficas, correspondientes a cuatro sujetos distintos.

En cuanto a los resultados para el movimiento de extensión, el incremento en el consumo de corriente es más evidente cuando se restringe la rotación de la articulación API, denotada como Re en la Figura 3.3 a). Las gráficas de cada sujeto en esta etapa del experimento, al igual que en el caso de la flexión presentan un comportamiento similar al de la Figura 3.3 a).

Respecto al experimento realizado con la persona con limitante en el movimiento, las gráficas del movimiento de extensión no presentan un incremento tan drástico como en las situaciones simuladas, debido a que su limitación de movimiento es mínima, sin embargo es posible detectar el incremento de la corriente con respecto a su línea base, ver Figura 3.3 b).

Para llegar al control de la interacción paciente-máquina es conveniente recurrir a un modelo simple pero significativo del contacto [4]. Sin embargo medir y modelar las características dinámicas de un modelo biológico como lo es un ser humano no resulta tan simple, por lo que se propuso que a

ISBN: 978-607-9394-14-1.



través de la variación en el consumo de corriente, que se puede obtener de forma práctica a través de la lectura que proporciona la tarjeta de control, se modele la relación entre el torque y el cambio en el desplazamiento debido al paciente como aproximación del modelo de interacción paciente-máquina.

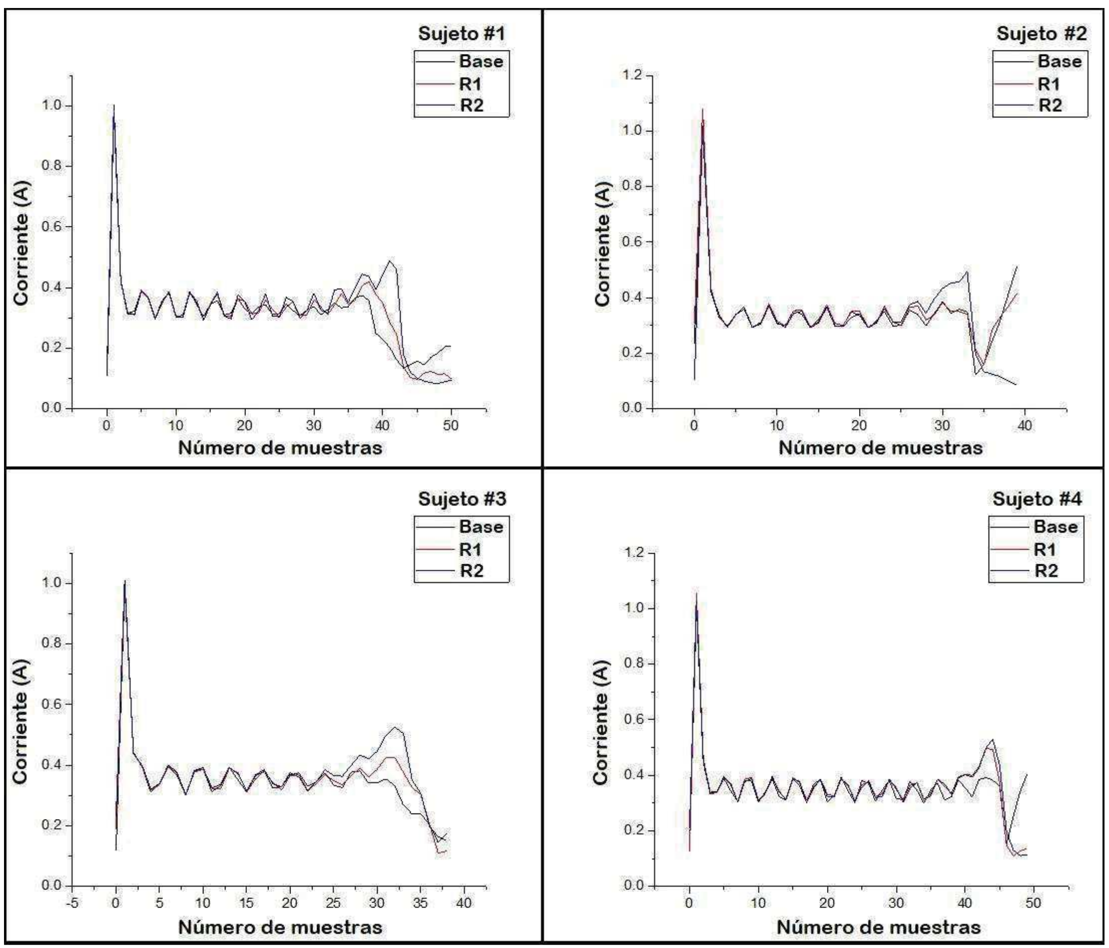


Figura 3.2. Gráficas de cuatro sujetos distintos.

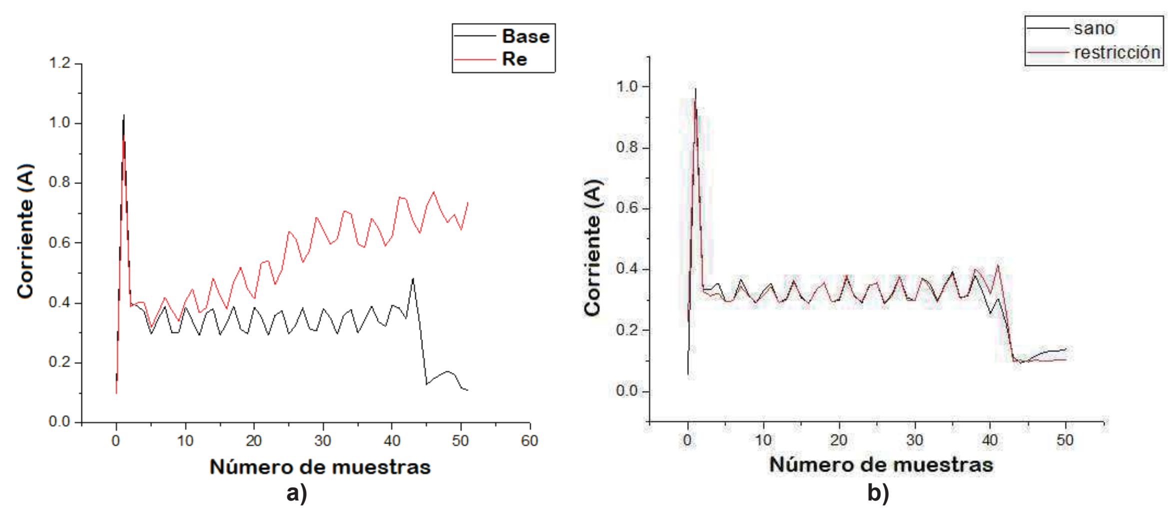


Figura 3.3. a) Comportamiento del consumo de corriente en el movimiento de extensión. b) Comportamiento de la corriente para una persona con limitación real de movimiento

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Como puede apreciarse el consumo de corriente aumenta según el tipo de restricción en las articulaciones, por lo que parece conveniente utilizarlo como representativo del torque de interacción, el cual estaría presente cuando una persona lesionada utilizará el dispositivo de rehabilitación de dedos de la mano. El comportamiento obtenido es claramente no lineal, debido en gran parte a la transmisión entre el motor y los eslabones del mecanismo.

A través de la ecuación (3) formulada en la sección 2.1, se transforman los resultados obtenidos en corriente a par, para calcular la constante de torque k_T se tomaron los valores nominales de torque y corriente del motor utilizado, obteniéndose un valor de 0.1430 Nm/A. Por consiguiente las gráficas se modifican en unidad y magnitud, en la Figura 3.4 se muestra este cambio para el movimiento de flexión correspondiente a las gráfica 3.1 presentada anteriormente.

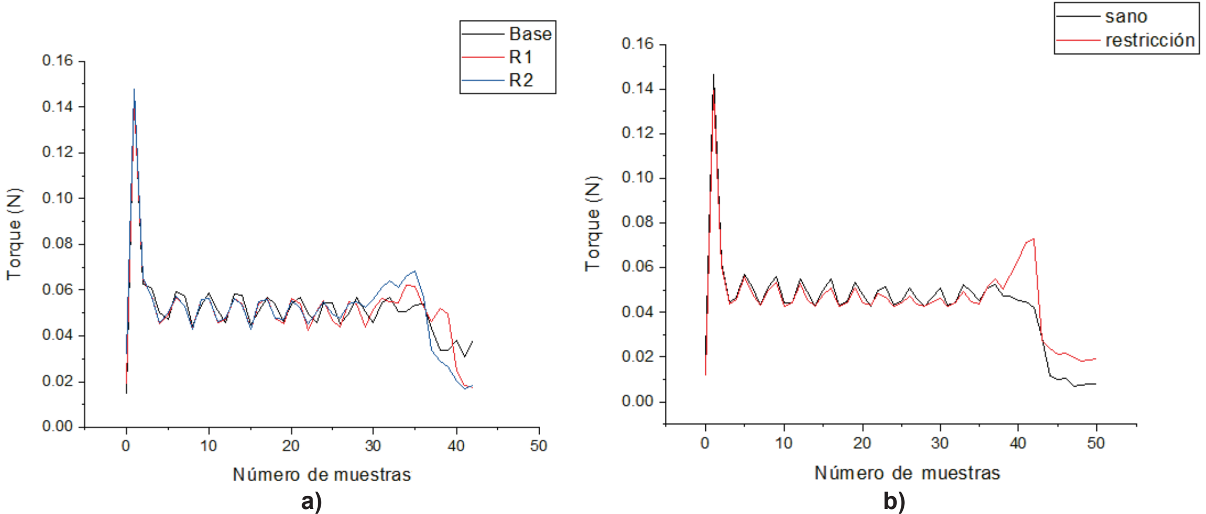


Figura 3.4. a) Comportamiento del torque en el movimiento de flexión. b) Comportamiento del torque para una persona con limitación real de movimiento.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para aproximar el par de contacto debido al proceso de interacción entre un dispositivo para la rehabilitación de dedos de la mano y un paciente, utilizando una analogía corriente-par; el diseño del experimento y la elección de utilizar esta analogía es debido a las características propias del sistema con el que se realizaron las pruebas, se consideró apropiado medir el consumo de corriente ya que el acoplamiento entre transmisión-mecanismo-paciente representa una carga para el actuador, y a través de la constante de torque del motor se puede convertir la medición a unidades de torque. Se simularon las condiciones de restricción en las articulaciones de los voluntarios y se obtuvieron un conjunto de gráficas representativas de los comportamientos esperados, la variación del par de contacto conforme al tipo de restricción se obtuvo multiplicando la variación del consumo de corriente por la constante de torque del motor. Los resultados de la estimación del par de contacto se utilizarán y evaluarán durante el desarrollo del diseño del modelo de control del rehabilitador, el cual se encuentra en etapa de desarrollo.

Al presentar cambios de magnitud conforme se restringían las articulaciones, el par debido al contacto se vuelve variable para cada sujeto, por lo que las curvas obtenidas son independientes y se espera que permitan probar la versatilidad y robustez del control en desarrollo. Aunque las curvas son representativas de cada sujeto, presentan un comportamiento similar entre ellas, por lo que se determinó que el número de experimentos realizados fue suficiente, tal como se muestra en la sección de resultados es bastante notorio el incremento del par conforme se tiene mayor restricción de movimiento.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Cómo se mencionó con anterioridad elegir "la mejor analogía" sigue siendo tema de discusión abierto, y en gran medida dependerá de las características de los sistemas a evaluar, con la aproximación aquí presentada esperamos contribuir con una aplicación práctica de las analogías electro-mecánicas, pero principalmente presentar un modelo sencillo para medir la interacción entre sistemas, particularmente entre dispositivos de rehabilitación y seres humanos.

Referencias

[1] Instituto Mexicano del Seguro Social. *"Guía clínica para la atención de lesiones traumáticas de la mano"*, Revista Médica del IMSS, vol. 41,1, pp. 109, 2003.

[2] Krebs, H., Edwards, D. & Hogan, N. *"Forgoing Mens et Manus: The MIT Experience in Upper Extremity Robotic Therapy"*. Springer International Publishing. D.J. Reinkensmeyer, V. Dietz (eds.), Neurorehabilitation Technology, pp. 333-350, 2016.

[3] Burgar, C., Lum, P., Shor, P. & Van der Loos, H. *"Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Standford experience"*. Journal of Rehabilitation Research and Develoment, vol. 37, 6, pp. 663-673,2000.

[4] Reyes, F. *"Robótica. Control de robots manipuladores"*. Alfaomega, México, 1era. Ed., 2011.

[5] Hogan, N. *"Stable execution of contact tasks using impedance control"*. IEEE, pp. 1047, 1987.

[6] Tchakoua, P., Ouhrouche, M., Tameghe, T., Ekemb, G., Wamkeue, R., Slaoui-Hasnaoui, F. *"Development of Equivalent Electric Circuit Model for Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotor using Mechanic-Electric Analogy Approach".* IEEE, 2015.

[7] Valdivia, C. "*Sistemas de control continuos y discretos"*. Paraninfo, España, 1era. Ed., 2012.

[8] Tawfiq, S., Ahmad, M. *"Electromechanical analogy for d_{33} piezoelectric harvester power calculations".* 2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), IEEE, 2015.

[9] Dobkin, B., Williams, J. *"Analog Circuit Design. A Tutorial Guide to Applications and Solutions".* Elsevier, EUA, 1era. Ed., 2011.

[10] Cascella, F., Sorin, M., Formosa, F., Teyssedou, A. *"Modeling the dynamic and thermodynamic operation of Stirling engines by means of an equivalent electrical circuit"*. Energy Conversion and Management, vol. 150, pp. 295-303, 2017.

[11] Hogan, N., Breedveld, P. *"The physical basis of analogies in network models of physical system dynamics".* Simulation Series, vol. 31, pp. 96-104, 1999.

[12] Aguilar, J. *"Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de la mano"*. Tesis doctoral, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México, 2016.

[13] Instituto Politécnico Nacional. *"Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de flexoextensión de los dedos de la mano*". Solicitud de patente. MX/E/2014/083759.

[14] Zapatero, A., Castillo, E. *"Control design for a fingers rehabilitation device"*, 3rd IEEE Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), IEEE, 2017.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 4, pp. 37-46.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Prototipo de Asistente Virtual para su Aplicación en Edificios Inteligentes

Martínez Guapo Luis Alberto, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Ramos Arreguín Juan Manuel, Vargas Soto José Emilio y Aceves Fernández Marco Antonio

Facultad de Informática ([1]), Facultad de Ingeniería ([2 - 5]).
Universidad Autónoma de Querétaro.

Resumen

Se propone la aplicación de asistentes virtuales en edificios inteligentes, en edificios inmóticos y domóticos, siendo el desarrollo de este prototipo un desarrollo completamente OpenSource. Se implementó un asistente virtual con interacción por comandos de voz en una tarjeta Raspberry Pi 3 haciendo uso de los servicios de voz a texto (STT) y texto a voz(TTS) que proporciona Google Cloud Platform, utilizando lenguaje Python. Se implementó y se incorporó un protocolo UART para comunicación serial entre el asistente virtual (tarjeta Raspberry Pi) y una tarjeta de desarrollo Arduino, para el control de actuadores y el monitoreo de sensores de interés.

Palabras clave: Asistente Virtual, Voz a Texto(STT), Texto a Voz (TTS), Motor Lógico (Logic Engine), Automatización de tareas, Edificios Inteligentes.

1. Introducción

Los asistentes virtuales no son tan comunes, sin embargo, son muy novedosos y muy interesantes por la capacidad y cantidad de desarrollo de aplicaciones que se les puede dar. Los asistentes virtuales que existen en el mercado se encuentran disponibles en su mayoría para computadores, dispositivos móviles y/o usables (wearables), algunos alojados como servicios en la nube (cloud) como lo es el caso de Alexa de Amazon y el dispositivo echo dot, el cual se puede adquirir a un precio de $49.99 USD. El echo dot permite controlar directamente dispositivos creados por Amazon, y algunos otros dispositivos de fabricantes como Philips y TP-LINK, esta alternativa es costosa, pues se basa en la adquisición de dispositivos que interactúan directamente con echo dot, pero brinda la facilidad para controlar dispositivos, pues estos ya tienen una interfaz implementada.

En algunos otros casos, el funcionamiento de los asistentes virtuales está limitado por las empresas que los crearon, pues no hacen nada más fuera de su entorno de ejecución (interacción física).

Convencionalmente los asistentes virtuales no tienen interacción física con dispositivos de hardware, lo cual es un área de oportunidad en cuanto a explotación tecnológica para ampliar las aplicaciones que se le pueden dar a un asistente virtual principalmente en edificios inteligentes [1]. Se busca generar sinergia, innovación y generación de conocimiento al hacer convergencia entre distintas áreas tecnológicas como el software embebido [2], inteligencia artificial, interfaces de hardware, etc...

El objetivo de este proyecto es desarrollar un asistente virtual con reconocimiento de voz implementado en la tarjera Raspberry Pi 3 utilizando librerías OpenSource y mediante interfaces con tarjetas basadas en microcontroladores, se puedan ejecutar tareas de automatización simples indicadas por el usuario.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Asistentes virtuales

La llegada de los asistentes virtuales ha tenido un importante evento en la historia de la computación. Los asistentes virtuales son muy útiles ayudando a usuarios de sistemas computacionales automatizando y realizando tareas con la mínima interacción hombre-maquina.

La interacción entre un asistente virtual y un usuario debe ser natural, el usuario se comunica usando la voz y el asistente virtual lo procesa e interpreta y responde de la misma manera [3].

2.1 Arquitectura básica de un asistente virtual

Un asistente virtual convencional consiste en tres componentes principales, voz a texto (STT), motor lógico (Logic Engine) y texto a voz (TTS).

STT es el componente que convierte las instrucciones de voz del usuario a una cadena de texto que puede ser procesada por el Logic Engine. Esto involucra grabar la instrucción de voz dada por el usuario y utilizar un procesador de lenguaje natural para convertir la grabación a una cadena de texto. Como procesador de lenguaje natural se hace uso de la API SpeechRecognition de Google.

Se importa el módulo de reconocimiento de voz, se obtiene una instancia de reconocimiento, se obtiene una referencia del micrófono, se calibra el micrófono, se realiza la grabación de audio y se realiza el reconocimiento de voz en lenguaje español, utilizando el siguiente bloque de código:

```
import speech_recognition as sr
r=sr.Recognizer()

with sr.Microphone() as source:
    r.adjust_for_ambient_noise(source)
    audio=r.listen(source, timeout=None, phrase_time_limit=1)
    text=r.recognize_google(audio, language='es-MX')
```

Logic Engine es el componente que recibe la cadena de texto que devuelve STT para validar la instrucción dada por el usuario y de esta manera proporcionar una respuesta al TTS. Logic Engine puede ser considerado el cerebro del asistente virtual, maneja las consultas del usuario por medio de una serie de cláusulas programadas. El asistente decide que debe darse de como respuesta ante una instrucción específica. En este proyecto este componente es modificado para que valide también instrucciones de tareas de automatización, que es la característica que lo diferenciará de los asistentes virtuales convencionales.

TTS es el componente que recibe la salida o respuesta del Logic Engine y sintetiza la cadena de texto a audio para completar la interacción con el usuario. Es una parte de suma importancia, pues le da al asistente virtual un toque más humano. Para la síntesis de texto a voz se hace uso de la API de Google TTS.

Se importa el módulo de síntesis de voz, se importa el módulo para interactuar con el sistema operativo, se realiza la síntesis de texto a voz en lenguaje español, se guarda el audio recuperado en un archivo con formato mp3 y se reproduce el archivo guardado, utilizando el siguiente bloque de código:

```
from gtts import gTTS
import os

tts=gTTS(‘cadena de texto’, lang='es')
tts.save("audio.mp3")
os.system("mpg321 audio.mp3")
```

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2 Recursos para el desarrollo del asistente virtual

En recursos de hardware es necesario una Tarjeta Raspberry Pi 3, al menos una tarjeta Arduino, un micrófono compatible con sistemas operativos Linux, teclado, mouse y monitor para conectar la tarjeta Raspberry.

En cuanto software se refiere, se requiere instalar Raspbian en la tarjeta Raspberry, instalar Python en su versión 2.7, el gestor de paquetes pip, instalar PortAudio, Python-dev y también el IDE de Arduino. Por medio de comandos pip instalar las siguientes librerías:

1. PyAudio
2. gTTS
3. SpeechRecognition

Es de suma importancia contar con una conexión a internet bastante veloz, con 10Mbps el tiempo de respuesta es muy bueno.

2.3 Interacción del asistente virtual con dispositivos basados en microcontroladores

La necesidad de que el asistente virtual tenga interacción con dispositivos basados en microcontroladores se debe a que es necesario delegar funcionalidades, pues así el sistema es escalable, mantenible, modular y descentralizado. Se delegan tareas como el monitoreo y control de sensores y actuadores [4] a la tarjeta Arduino, para que la tarjeta Raspberry (el asistente virtual) se encargue solamente del procesamiento de voz, síntesis de voz y toma de decisiones y que de esta manera el desgaste a nivel de hardware sea menor, algo que es muy benéfico al performance (desempeño) del sistema.

Para realizar esta delegación de tareas se hace uso de comunicación serie entre la tarjeta Raspberry y la tarjeta Arduino utilizando un protocolo UART [5] en su modalidad **full-duplex** operando a 9600 baudios.

En Python se hace uso de la librería serial, la cual provee la clase y métodos necesarios para implementar el protocolo UART. Dado que la tarjeta Raspberry no está basada en microcontrolador, no es posible implementar interrupciones para las recepciones de datos por puerto serie, por lo que se implementa un **Thread** (Hilo de ejecución) para mantener un proceso independiente del programa principal, el cual actuará como un ciclo de escucha para la recepción de datos en el puerto serie.

En el caso de la tarjeta Arduino es diferente, sólo es necesario inicializar el puerto serie mínimo, indicando la velocidad de transmisión de datos (en este caso 9600 baudios). La tarjeta Arduino al ser basada en microcontrolador permite el uso de interrupciones, de forma más concreta **eventos en el puerto serie**, que es la forma por la cual se recuperan las instrucciones provenientes del asistente virtual (tarjeta Rapsberry) para su validación y ejecución.

3. Flujos de operación del asistente virtual

A diferencia de los asistentes virtuales convencionales, este asistente tiene la capacidad de interactuar con dispositivos basados en microcontroladores, de forma más general con cualquier dispositivo que tenga una interfaz de comunicación serie, característica que vuelve muy escalable. Incorporada esta característica, se han planteado tres flujos de operación diferentes para este asistente virtual: El flujo de operación de un asistente virtual convencional, el flujo de automatización y el flujo de monitoreo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.1 *Flujo de operación de un asistente virtual convencional*

En este flujo de operación, un usuario pregunta algo al asistente virtual, el asistente valida la petición, realiza toma de decisiones y sintetiza un audio con la respuesta para el usuario, Figura 1.

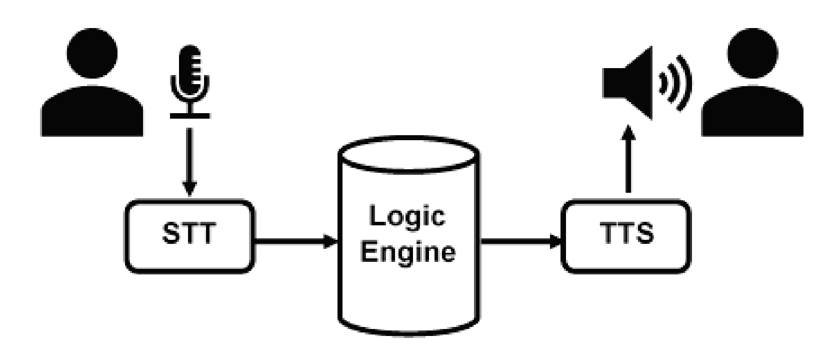


Figura 1. Flujo de operación de un asistente virtual convencional.

En este flujo es posible validar tantas instrucciones como funcionalidades sean implementadas e incorporadas al asistente virtual, tareas desde agenda de tareas con recordatorio por síntesis te voz, consulta de clima, fechas, reproducción de música. Para un ámbito más académico, es posible incorporar al asistente virtual conexión a bases de datos de tipo enciclopedia, para que el mismo asistente redacte la información solicitada al usuario, y con expectativas más altas, que el asistente virtual sea capaz de enseñar a un usuario temas de interés.

3.2 *Flujo de automatización del asistente virtual*

La implementación de un protocolo de comunicación serie en el asistente virtual, permite que este flujo de operación pueda llevarse a cabo, es en este proceso donde el usuario indicará al asistente virtual ejecutar alguna tarea, por ejemplo: Abrir una puerta o bloquear algún acceso, encender o apagar luces, encender el aire acondicionado e indicar la temperatura que se desea mantener todo por medio de comandos de voz, Figura 2.

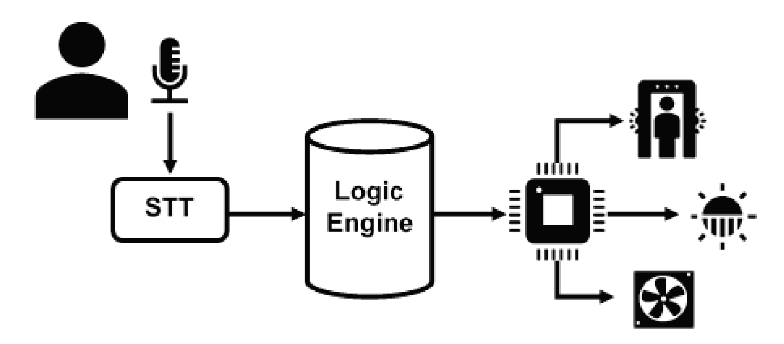


Figura 2. Flujo de automatización.

Incursionando más en temas de seguridad es posible que el asistente virtual sea capaz de controlar cámaras, incorporando también visión por computadora. Es en este flujo donde se puede hacer uso de gran variedad de actuadores, tantos como tareas se quieran o se necesiten automatizar.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.3 *Flujo de monitoreo del asistente virtual*

Este flujo se creó pensando en la capacidad del asistente virtual para alertar o reportar al usuario automáticamente sobre el estado de ciertas variables físicas o el posible caso de que ocurran ciertos eventos como que se detecte una fuga de gas, temperaturas demasiado altas en alguna zona del edificio, que una persona ajena al edificio intente ingresar por la fuerza. Este flujo comprende básicamente el monitoreo de sensores, aunque también es posible dotar al asistente virtual con la capacidad de realizar alguna acción específica cuando algún sensor detecte alguna anomalía en el entorno como se muestra en la Figura 3.

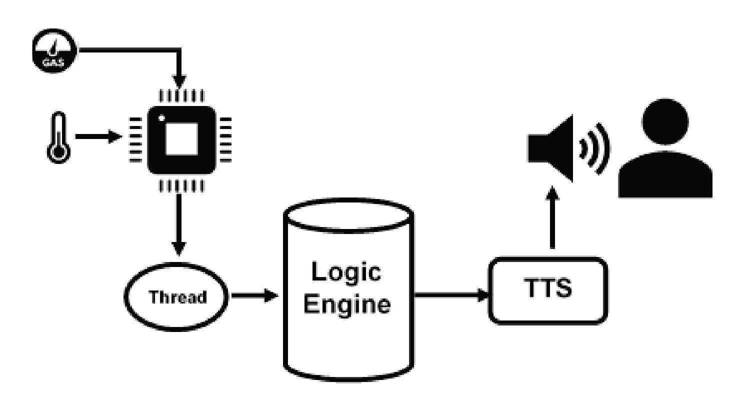


Figura 3. Flujo de monitoreo.

En este flujo de operación, es posible que el asistente virtual se comunique con cualquier tipo de dispositivo que tenga integrada una interfaz de comunicación serie. **El asistente virtual no está limitado a comunicarse sólo con microcontroladores que monitorean sensores.**

3.4 *Integración de los flujos de operación*

Integrados todos los flujos de operación el asistente virtual, valida instrucciones indicadas por el usuario y/o alertas provenientes de algún dispositivo que se comunique por interfaz serial. La validación de instrucciones no importando de donde provienen, todas se realizan en el componente Logic Engine, este componente esta implementado para realizar una correcta toma de decisiones de acuerdo con las instrucciones que recibe, es aquí donde se valida a que flujo de operación corresponde la instrucción recibida.

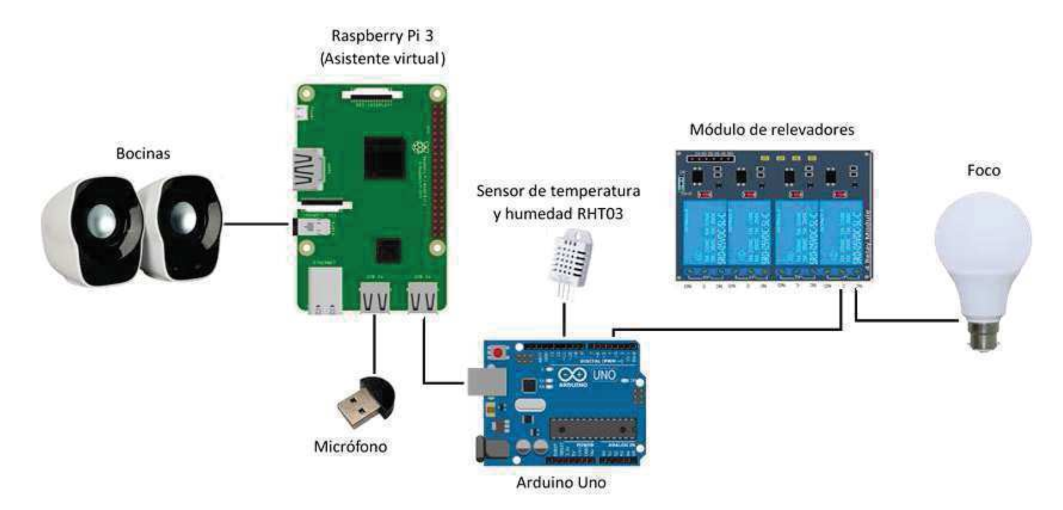


Figura 4. Arquitectura de hardware del prototipo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La Figura 4 muestra de forma gráfica la arquitectura del prototipo, mostrando en forma general los componentes de hardware que lo conforman.

4. Resultados y discusión

Se realizaron pruebas utilizando algunos sensores digitales y analógicos, relevadores y algunas pruebas simples de consulta. Durante el desarrollo del prototipo y la fase de pruebas se detectaron varias limitaciones las cuales no son críticas, pero el solventarlas hace que el asistente virtual pueda tener un mayor y mejor rendimiento, lo suficiente como para tratarlo como una versión beta.

4.1 Limitaciones

La principal limitación que tiene este prototipo es la dependencia de internet, pues para su funcionamiento es indispensable, además que requiere de una conexión veloz, otro punto que se debe destacar es la importancia de adquirir un micrófono con muy buena calidad y de gran alcance.

El servicio de síntesis de voz tiene un inconveniente, pues mientras más grande es la cadena de texto que se quiere sintetizar a voz más tardará el asistente virtual en dar una respuesta al usuario, dado que el servicio que se consume devuelve un stream de audio, más no se sintetiza el texto letra por letra.

Las limitaciones detectadas pueden ser mitigadas, para remover la dependencia de internet es necesario implementar un procesador de lenguaje natural y un sintetizador de texto a voz, lo cual requiere tiempo de investigación. Para adquirir un micrófono de calidad sólo se requiere contar con el presupuesto necesario.

4.2 Condiciones de pruebas

Las pruebas se realizaron en ambientes de poco ruido. La primera prueba se realizó con un sensor DHT03 (sensor digital, Figura 5) de temperatura y humedad para el flujo de monitoreo. La prueba consistió en lo siguiente: En cuanto la tarjeta Arduino obtuviera una lectura de temperatura o humedad en un rango especificado, se envía al asistente virtual por puerto serie una trama de datos indicando si se trataba de humedad o temperatura, y el valor que se estaba obteniendo del sensor. La trama proveniente de la tarjeta Arduino es recibida por el asistente virtual y este sintetiza un audio con indicando al usuario “Se ha detectado una temperatura de x grados centígrados”, y en el caso de humedad “Se ha detectado una humedad de x %”.

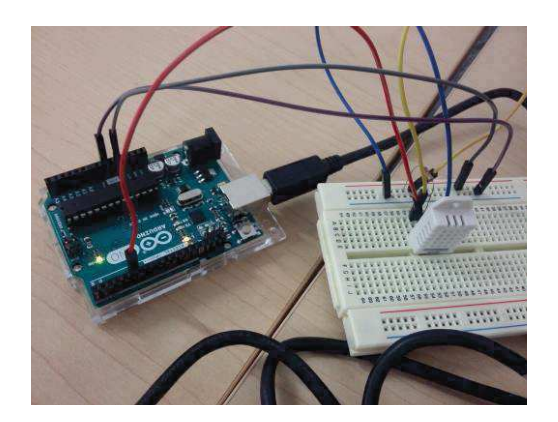


Figura 5. Sensor DHT03 conectado a la tarjeta Arduino Uno.

El asistente virtual recibe la trama con el formato **“xn\n”**, donde **x** indica la variable física que se está monitoreando, **n** es el valor de la variable física y **\n** es el carácter de fin de línea (EOL) necesario

ISBN: 978-607-9394-14-1.



para que la trama pueda ser leída del puerto serie. En la Figura 6, se muestra la trama enviada por la tarjeta Arduino y la cadena de texto que será sintetizada a voz.

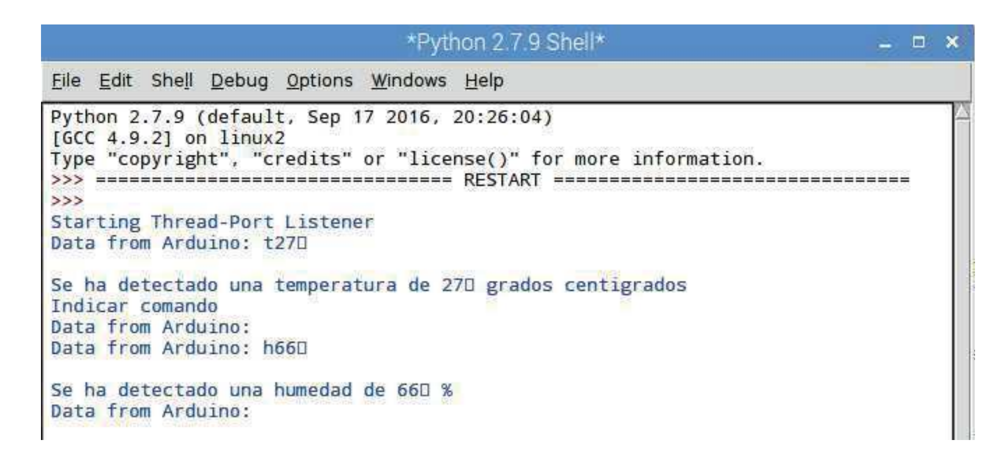


Figura 6. El asistente virtual recibe tramas con valores de temperatura y humedad.

Para la segunda prueba se utilizó un sensor analógico para medir distancia Sharp GP2Y0A41SK0F, la prueba fue de la siguiente manera: Se validaba la aproximación de algún objeto hacia este sensor (Figura 7), en el momento en que la tarjeta Arduino obtiene una lectura que indica que un objeto se encuentra a una cierta distancia, se envía al asistente virtual una trama de datos indicando la distancia a la que se detecto el objeto. Al igual que en la primera prueba, el asistente virtual recibe la trama de datos y sintetiza un audio indicando al usuario “Se detectó un objeto a x cm de distancia” del sensor (colocado en una zona de interés).

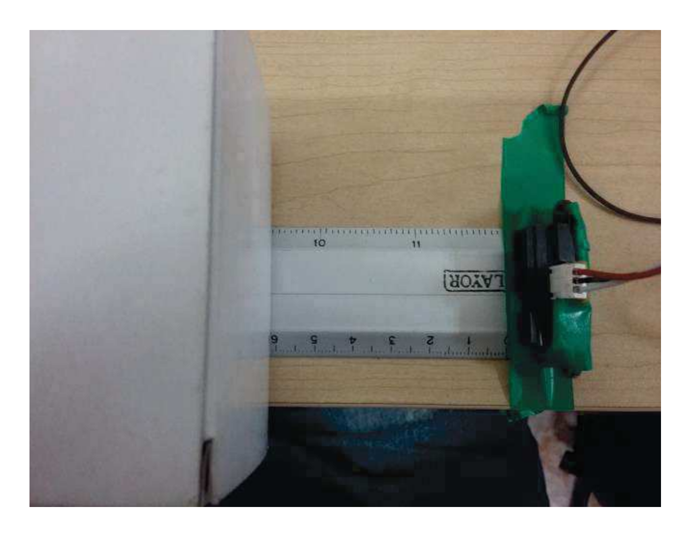


Figura 7. Objeto colocado aproximadamente a 6cm del sensor.

Al igual que en la primera prueba, se recibe una trama con el formato **“xn\n”**, Figura 8.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
*Python 2.7.9 Shell*
File  Edit  Shell  Debug  Options  Windows  Help
Python 2.7.9 (default, Sep 17 2016, 20:26:04)
[GCC 4.9.2] on linux2
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>> ================================ RESTART ================================
>>>
Starting Thread-Port Listener
Indicar comando
Data from Arduino:
Data from Arduino: d6.47

Se detecta un objeto a 6.47cm de distancia
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Data from Arduino:
```

Figura 8. El asistente virtual recibe trama con valor de distancia.

En la tercera prueba, se hace uso de un módulo de 4 relevadores, esto para encender un foco conectado a una toma de corriente alterna. Un usuario dicta la instrucción “luces” y el asistente virtual la valida y envía a la tarjeta Arduino un código para indicarle que active el relevador que permitirá que el foco sea encendido y para apagarlo se dicta también la misma instrucción.

En la Figura 9 se muestra las instrucciones reconocidas por el asistente virtual para encender y apagar el foco.

```
Virtual Assistant says: Bienvenido el sistema ha iniciado!
Starting Thread-Port Listener
Say something!
Google Speech Recognition thinks you said: luces
Data from Arduino:
Say something!
Google Speech Recognition could not understand audio
Data from Arduino:
Say something!
Google Speech Recognition could not understand audio
Say something!
Data from Arduino:
Google Speech Recognition could not understand audio
Say something!
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Google Speech Recognition thinks you said: luces
Say something!
Data from Arduino:
Data from Arduino:
Google Speech Recognition could not understand audio
Say something!
Data from Arduino:
Google Speech Recognition could not understand audio
Say something!
```

Figura 9. Instrucción luces para encender y apagar foco.

En las Figuras 10 a y b, se muestra el foco encendido y apagado después de validar la instrucción luces.

Como cuarta prueba se hace la consulta del concepto de electrónica para que el asistente proporcione la respuesta, indicando el siguiente comando: **“define concepto_de_interes”.** En la Figura 11 se muestra la instrucción recibida por el asistente virtual y la respuesta que dictará al usuario.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



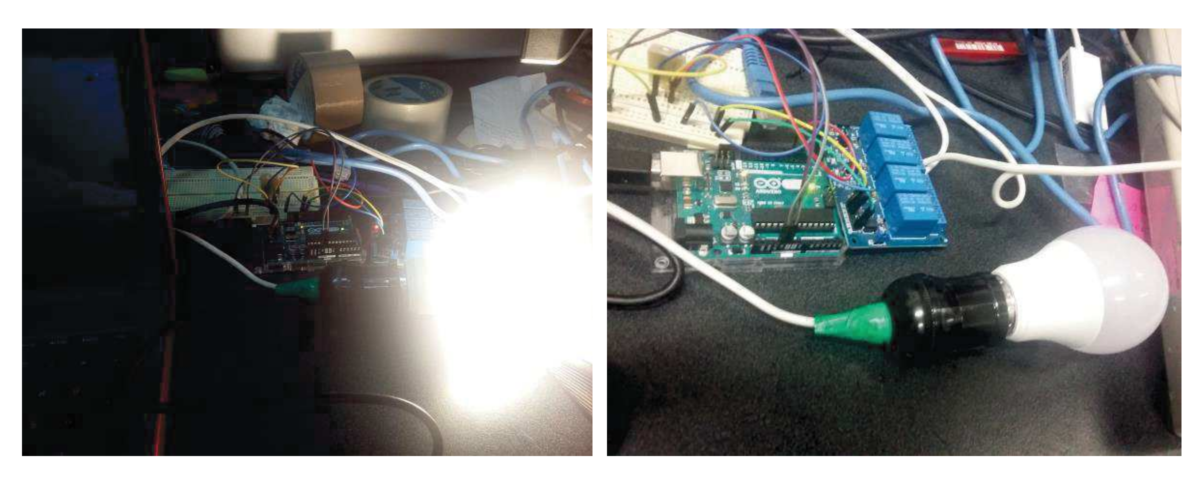


Figura 10. a) Foco encendido al validar instrucción luces, b) foco apagado al validar de nuevo la instrucción luces.

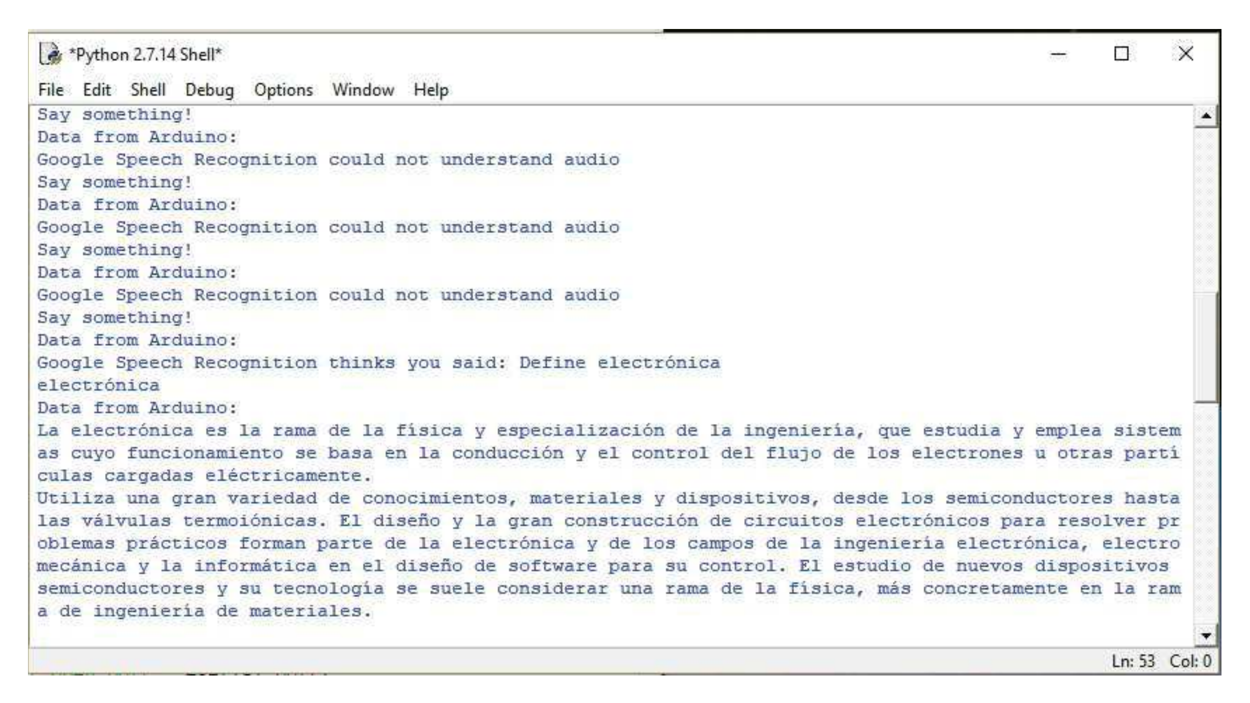


Figura 11. El asistente virtual recibe la instrucción Define electrónica.

La tercera y cuarta prueba se realizaron en el sistema operativo Windows, por la limitación del poco alcance del micrófono en la tarjeta Raspberry.

Las pruebas uno y dos comprenden el flujo de operación de monitoreo, la prueba tres comprende el flujo de automatización y la prueba cuatro comprende el flujo de un asistente convencional.

5. Conclusiones

Estamos en una época en la que hay gran diversidad de tecnologías, que por si solas son sorprendentes, novedosas y muy interesantes, pero ¿Qué pasa cuando convergen dos o más

ISBN: 978-607-9394-14-1.



tecnologías?, el resultado, sinergia tecnológica. Esta sinergia de la que se habla está al alcance de cualquier persona con interés y ganas por crear e innovar. En nuestros días existen muchas tecnologías OpenSource, las cuales podemos tomar, modificar y/o adaptar a nuestras necesidades para crear nuevas cosas. Estas tecnologías aguardan a ser explotadas para mejorar nuestro entorno. La propuesta que se presenta aquí, en un futuro será algo muy común.

Se pretende a futuro, implementar un procesador de lenguaje natural y un sintetizador de texto a voz, para eliminar la dependencia de internet y aumentar los tiempos de respuesta del asistente virtual. Se tiene planeado incorporarle al asistente virtual la capacidad de aprendizaje, esto utilizando técnicas de inteligencia artificial. Se busca además sustituir el protocolo de comunicación serie por un protocolo TCP/IP para montar al asistente virtual en una red.

Los asistentes virtuales pueden ser implementados en cualquier lugar, en casas, oficinas, hospitales, departamentos de policías, escuelas, etc. Entre las aplicaciones de gran aporte que se prevén están: como medio de monitoreo y cuidado para pacientes y/o personas de la tercera edad, también como medio de ayuda en vías públicas como paradas de autobuses y en escuelas como una herramienta de enseñanza.

Referencias

[1] Romero C, Vázquez F & Castro C. *"Domótica e inmótica". Alfaomega, México, 3ra Edición, 2011.*

[2] Aceves M & Ramos J. *"Fundamentos de Sistemas Embebidos".* Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., México, 2012.

[3] Pant T. *"Building a Virtual Assistant for Raspberry Pi"*. Ghaziabad, Uttar Pradesh, India, Apress, 2016.

[4] Corona L, Abarca G & Mares J. *"Sensores y actuadores".* Larousse – Grupo Editorial Patria, México, 2014.

[5] García E. *"Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC".* Alfaomega, México, Primera edición, 2008.

[6] Mechling L, Gast D & Seid N. *"Using a personal digital assistant to increast independent task completion by students with autism spectrum disorder"*. Journal of autism and developmental disorders, 2009.

[7] Hauswald J, Laurenzano M, Zhang Y, Li C, Rovinski A, Khurana A & Mars J. *"Sirius: An open end-to-end voice and vision personal assistant and it's implications for future warehouse sacale computers"*. In ACM SIGPLAN notices (Vol. 50, No. 4, pp 223-238). ACM, 2015.

[8] Hernández O. *"Edificios inteligentes y sostenibles: arquitectura de percepción y control para la gestion de energía".* Madrid, 2016.

[9] Moumtadi F, Delgado J & Granados F. *"Activación de funciones en edificios inteligentes utilizando comandos de voz desde dispositivos móviles"*. Ingeniería Investigación y Tecnología. (Vol. 15, No 2, pp 175-186), 2014.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 5, pp. 47-57.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de un Actuador Blando y Evaluación Experimental de su Trayectoria Usando Análisis de Imágenes

Sandoval Castro X. Yamile[1], Castillo Castañeda Eduardo[2], Ruíz Torres F. Maximiano[2] y Hernández Reyna José[3]

[1] CONACYT-IPN. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090.
[2]IPN. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090
[3] CFATA - UNAM. Boulevard Juriquilla No. 3001, Querétaro, Qro. C.P. 76230

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un actuador blando neumática, basado en el elastómero líquido MoldStar 30, se describe el modelado, fabricación y evaluación experimental de la trayectoria real mediante el uso de análisis de imágenes. La geometría y el material que se utiliza para el diseño del actuador es fundamental, pues de estas variables dependerá la rigidez, movilidad y trayectoria a seguir. Se utilizó Abaqus para estimar la cinemática y dinámica del actuador, se obtuvo la relación esfuerzo-deformación, de esta manera se sabe cuánta carga debe aplicarse para obtener el desplazamiento deseado a la velocidad deseada. Para construir el actuador fue necesario diseñar moldes que cumplieran con la morfología del actuador, se fabricaron con tecnología de impresión 3D y el elastómero fue vaciado. La trayectoria real del actuador fue validada a través de análisis de imágenes, utilizando un tablero de calibración fue posible determinar la deformación del actuador en función de la presión de entrada, estos datos fueron comparados con los estimados en el modelado dinámico teniendo variaciones insignificantes. El diseño de actuadores blandos es el preámbulo para el desarrollo de robots blandos que permitan la adaptabilidad al ambiente.

Palabras clave: Actuador blando, MoldStar 30, Modelado dinámico, Análisis de imágenes.

1. Introducción

Los robots convencionales están construidos en materiales rígidos, lo que limita su capacidad de elasticidad y deformación, además de evitar la adaptabilidad de su forma a las restricciones del medio donde se desenvuelve. A medida en que la robótica se expande más allá de la manufactura y automatización industrial, áreas como la medicina, asistencia, inspección, rescate, etc, requieren que los robots sean más flexibles, explorando la diversidad de materiales y organismos encontrados en la naturaleza, [1].

Un "**soft robot**" llamado de aquí en adelante "Robot blando" se componen principalmente de materiales fácilmente deformables, como fluidos, gel y elastómeros que combinan las propiedades elásticas y reológicas de tejidos y órganos biológicos, por ejemplo, un pulpo desplazándose a través de una abertura estrecha o una oruga que rueda por un terreno irregular. Un robot blando debe adaptar su forma y estrategia de locomoción para una amplia gama de tareas, condiciones ambientales y la evasión de obstáculos.

El trabajo presentado por [2] define que el alcance de un robot blando incluye el extremo de materiales viscoelásticos que exhiben tanto líquido como propiedades de aspecto sólido dependiendo de las condiciones de carga, tales materiales reológicamente complejos son abundantes en organismos biológicos, incluidos geles de mucina, sangre, citoplasma celular y moléculas de proteína o ADN. Sin embargo, materiales comparativamente blandos y reológicamente complejos aún no están en la caja de herramientas estándar del ingeniero. Además, los autores muestran el proceso de diseño

ISBN: 978-607-9394-14-1.



que maneja la complejidad reológica en la relación entre el rendimiento, el valor de la función propiedades y formulación del material.

En [3] se presentan la caracterización de tres elastómeros representativos usados en actuadores blandos: Sylgard 184, Smooth-Sil 950 y EcoFlex 00-30, a través de pruebas mecánicas destructivas.

El trabajo descrito en [4] proporciona enfoques de diseño y fabricación de actuadores blandos utilizando elastómeros y se exploran las morfologías (acanalada, cilíndrica y plisada) del actuador compuestas enteramente de caucho y de silicona blanda. En [5] se desarrolló un actuador blando neumático, se caracterizó su trayectoria y la fuerza ejercida variando el material de construcción, tamaño y número de cámaras. Por su parte, en [6] se describe un proceso de fabricación flexible y rápido para la construcción de actuadores blandos, además de evaluar experimentalmente el número adecuado de canales de aire. La manufactura de un robot blando se puede hacer también a partir de impresión 3D, en [7] se propone la fabricación 3D de un actuador blando que permite torsión y extensión.

Las aplicaciones de los robots blandos son variadas, van desde el diseño de pinzas como efector final de un robot convencional [8], [9]; robots con locomoción acuática, [10], [11]; hasta la robótica de rehabilitación, [12].

El área de los robots blandos promete una alternativa de diseño para todos los campos de la robótica, en especial para la robótica de servicios profesionales, ya que permite tanto adaptabilidad dentro del entorno, como seguridad para el medio en el que se encuentre el robot.

En este trabajo se presenta el diseño de un actuador blando, su análisis de elementos finito tomando en cuenta los parámetros de hiper-eslasticidad para un elastómero líquido. Se muestra la fabricación con ayuda de moldes en impresión 3D y las pruebas de funcionamiento por accionamiento neumático.

2. Diseño y modelado dinámico del actuador blando

2.1 Diseño del actuador

El diseño del actuador blando consiste de una serie de cámaras dispuestas en una fila como lo muestra la figura 1, obsérvese que las secciones de pared más finas son las que se encuentran entre cada cámara. La capa limitante de tensión es un trozo de papel incrustado en la base, aunque podría ser cualquier otro material que ofrezca mayor rigidez al actuador.

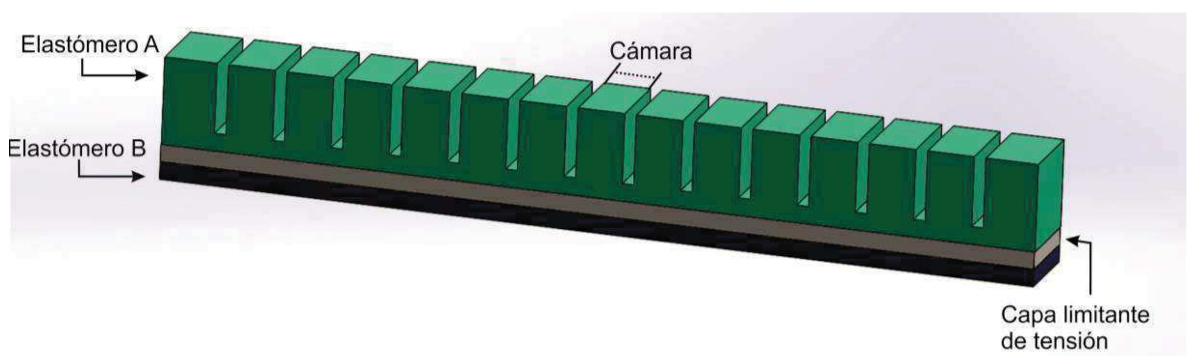


Figura 1: Composición del actuador blando.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la figura 2 se puede observar a detalle el diseño del actuador blando, se tiene un total de 15 cámaras que al ser infladas a través de accionamiento neumático se expanden, y las paredes delgadas entre las cámaras sobresalen más. Esto provocaría que el actuador se expandiera en la dirección axial, pero como la capa limitadora de deformación no se expande, el actuador se dobla en su lugar.

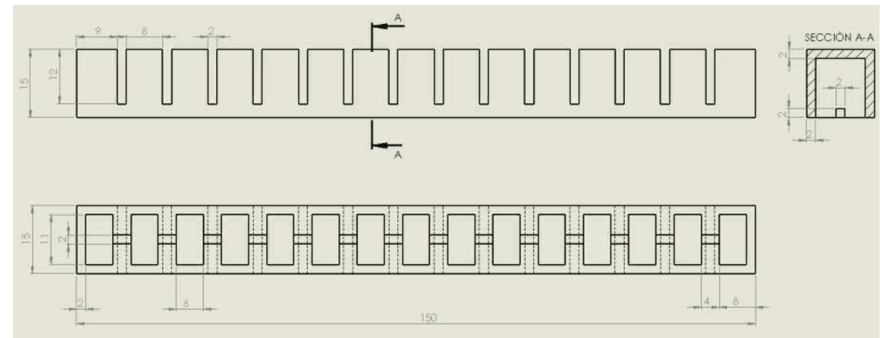


Figura 2: Medidas del actuador blando.

El actuador consta de dos partes como lo presenta la figura 3: el cuerpo principal, que se expande cuando está inflado, y una base que contiene la capa de papel inextensible incrustada en el elastómero.

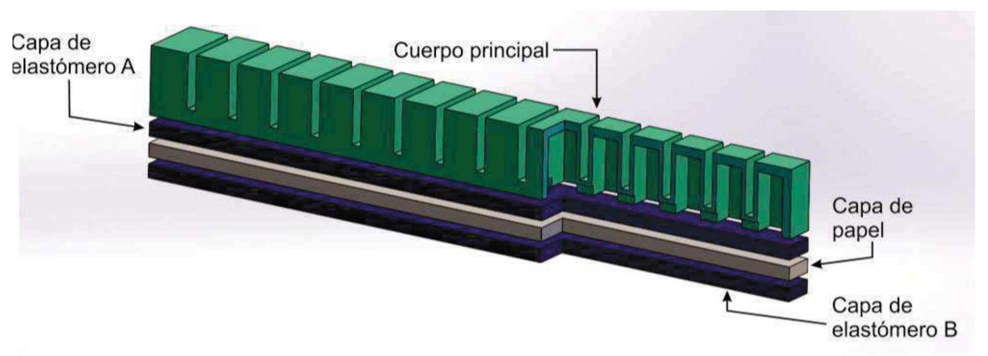


Figura 3: Partes del actuador.

2.2 Modelado dinámico

El estudio cinemático y dinámico de los robots convencionales se hace a través de la teoría de la mecánica del cuerpo rígido. Los robots blandos utilizan materiales altamente flexibles y de comportamiento no lineal, el uso del análisis de elemento finito (FEM) permite estimar la relación esfuerzo-deformación de los actuadores blandos, de esta manera es posible conocer cuánta presión debe aplicarse al actuador blando para llegar a una posición deseada (deformación). El análisis FEM es de gran utilidad, ya que es posible modelar el comportamiento de los actuadores y conocer el efecto que causa el cambio de parámetros como rigidez del material, número y tamaño de las cámaras, ancho de las paredes, etc., sin necesidad de fabricar el actuador, [13-15]. Para llevar a cabo el modelado dinámico se hizo uso del software especializado en análisis de elementos finito, Abaqus/CAE; se utilizaron los parámetros de hiper-elasticidad dados por [6] que se describen en a tabla 1.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Parámetros de los materiales Mold Star 30 y papel.

Parámetros	Mold Star 30	Papel
Modelo hiper-elástico Yeoh (C10)	0.01208MPa	-
Modelo hiper-elástico Yeoh (C20)	0.02 MPa	-
Densidad	1130 Kg/m³	750 Kg/m³
Módulo de Yong	0.1 MPa	6500 MPa
Radio de Poisson	-	0.2

En el modelado del actuador se toma en cuenta la creación de dos distintos materiales: Mold Star 30 y el papel. Se hizo el ensamble en Abaqus como lo muestra la figura 4 donde es posible apreciar la cavidad del actuador por la cual se desplazará el aire.

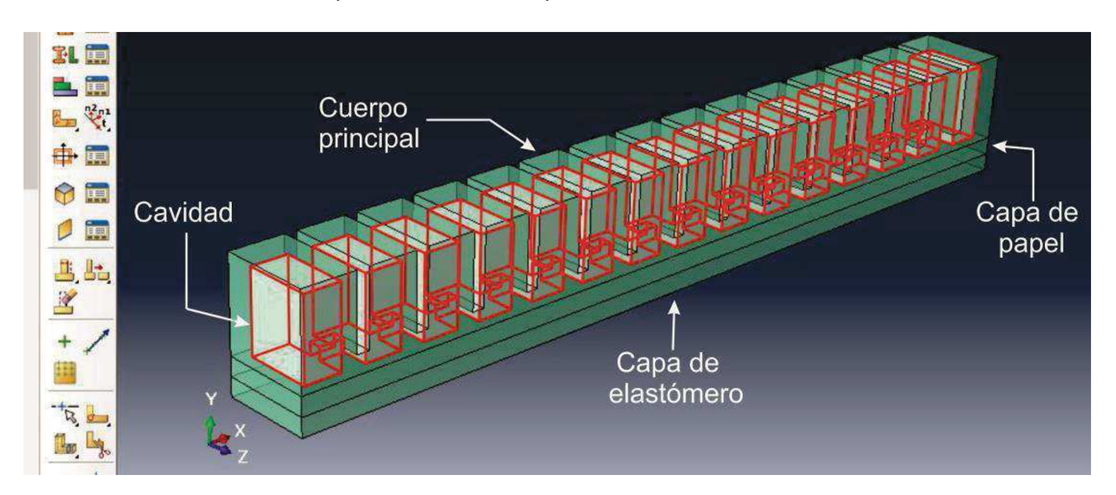


Figura 4: Ensamble del actuador en Abaqus.

Se toma en cuenta la fuerza gravedad como una de las condiciones (figura 5) para el modelado dinámico, nótese que ésta se define a lo largo del eje Y en la cara que permanecerá fija.

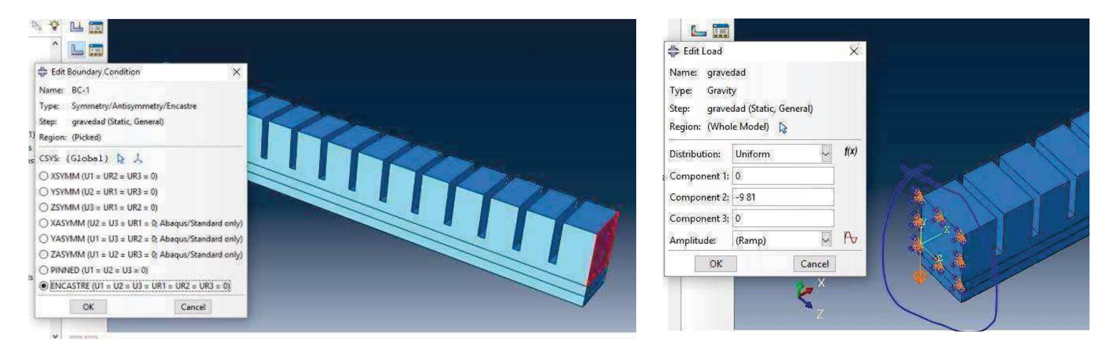


Figura 5: Definición de la fuerza gravedad en el actuador.

Se define la también la fuerza que ejercerá la presión de aire para lograr la deformación del actuador, esto se puede observar en la figura 6. La presión tiene una magnitud de 0.055 MPa.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



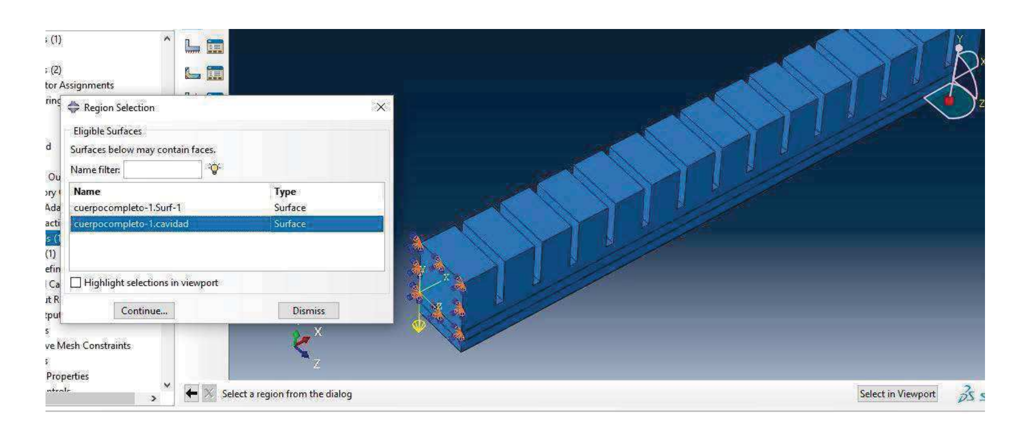


Figura 6: Definición de la presión de aire.

Cuando un actuador neumático está suficientemente inflado, las paredes de las cámaras adyacentes entrarán en contacto entre sí. Sin embargo, Abaqus necesita explícitamente que se le tome en cuenta esta interacción física; de lo contrario, en el resultado modelado se tendrán las paredes simplemente pasando una a través de la otra, como se ve la figura 7. Se define la interacción de tipo "Self-contact (Standard)", asegurándose que esta condición se aplica durante la aplicación de la carga de presión, pues en este momento cuando las paredes comienzan a tocarse.

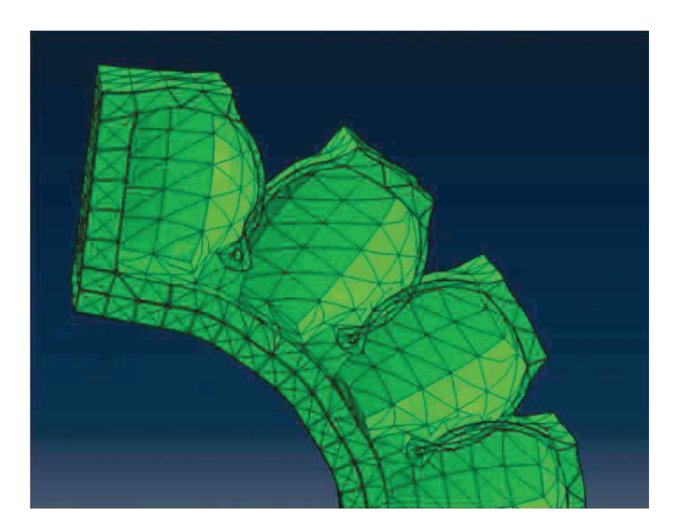


Figura 7: Interacción entre las cámaras cuando el actuador se infla.

Una vez definidas las cargas, se hace el mallado para el análisis FEM. Se usó el tamaño 3 para evitar que el modelo se vuelva demasiado rígido (si el tamaño de la malla es demasiado pequeño). La figura 8 muestra el mallado del actuador.

Finalmente, se ejecuta la simulación. En la figura 9 se muestra el resultado tras aplicar las condiciones y fuerzas necesarias, es posible observar dos situaciones: cuando el actuador se encuentra en reposo y cuando se aplicó la presión de 0.055 MPa (máxima deformación del actuador).

La simulación se desarrolló en 100 pasos, la figura 9 muestra una secuencia de la deformación del actuador, pero solo en 9 pasos por efectos de visualización.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



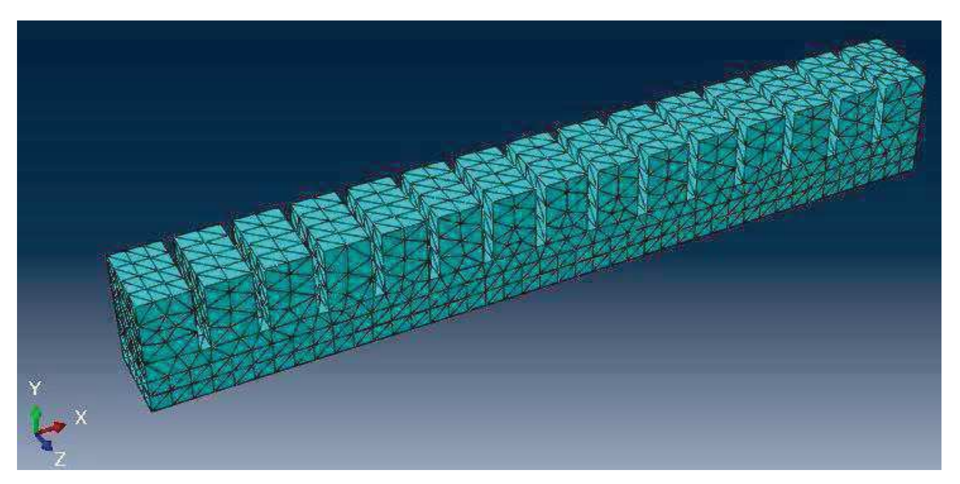


Figura 8: Mallado del actuador.

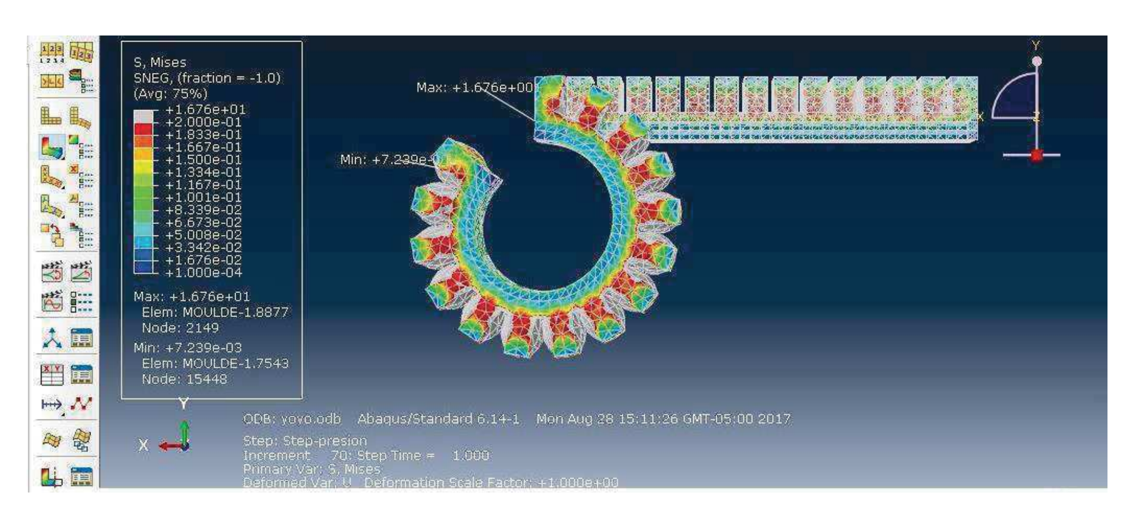


Figura 9. Deformación del actuador.

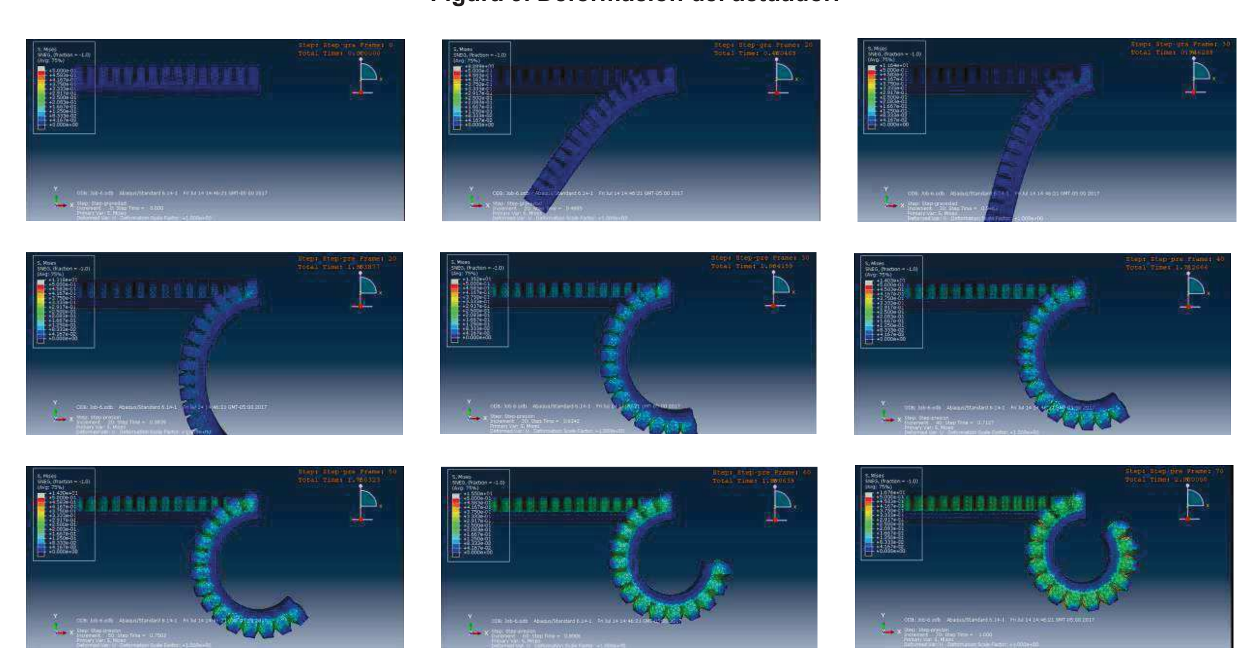


Figura 9: Secuencia de deformación del actuador en 9 pasos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Construcción y pruebas de funcionamiento

3.1 Construcción del actuador.

La construcción de actuadores neumáticos en base a elastómeros líquidos, requiere del diseño de moldes que proporcionen la morfología deseada. La figura 10 muestra los moldes que fueron fabricados con ayuda de tecnología de impresión 3D, el molde de la izquierda corresponde a la base del actuador y el de la derecha al cuerpo principal.

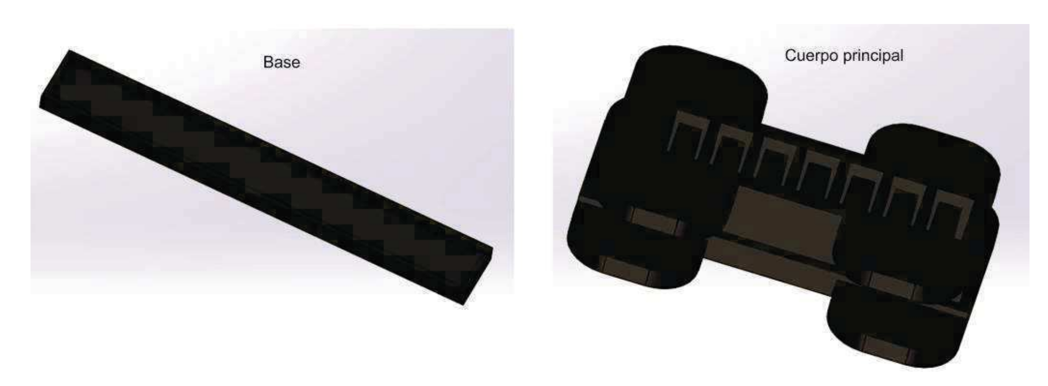


Figura 10: Moldes para la construcción del actuador neumático.

El procedimiento de fabricación del actuador consiste en mezclar el elastómero y posteriormente vertirlo en los moldes. El molde del cuerpo principal se llena por completo, mientras que el molde base se llena a la mitad, para así colocar la pieza de papel. Una vez que el elastómero se seca, el cuerpo principal se desmolda.

En necesario llenar por completo el molde base con el elastómero líquido y colocar por encima el cuerpo principal desmoldado, así el elastómero liquido fungirá como pegamento entre ambas piezas, se deja secar y finalmente se desmolda el actuador entero.

La figura 11 muestra el actuador blando fabricado con un elastómero líquido.

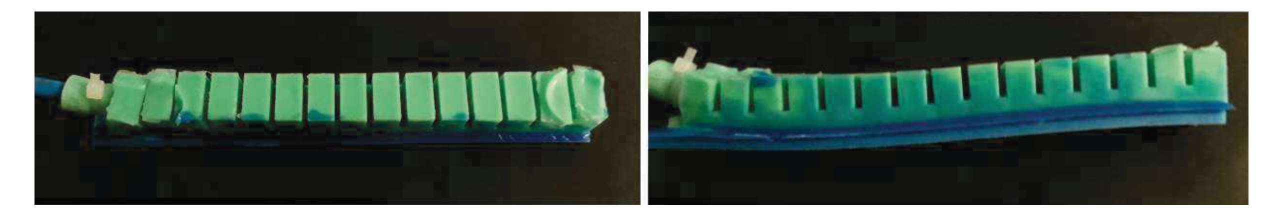


Figura 11: Actuador blando.

3.2 Evaluación experimental del desempeño del actuador.

En esta sección se describe la evaluación experimental de la trayectoria del actuador, usando análisis de imágenes. El objetivo de realizar estas pruebas es validar los resultados obtenidos del modelo dinámico realizado en Abaqus. La plataforma de evaluación se muestra en la figura 12, donde es posible apreciar la estructura en la que se monta el actuador y que tiene el patrón de calibración, a través de una Raspberry Pi 3 se envían los datos de la cámara a la PC para hacer el procesamiento. En el sistema también se puede ver el controlador de presión.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



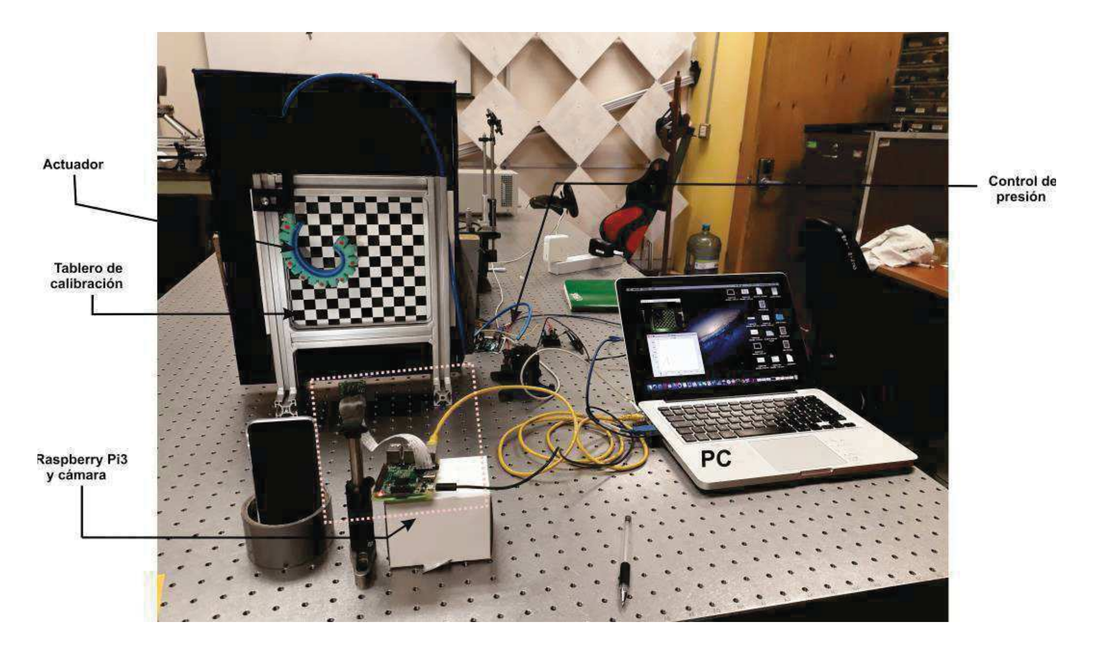


Figura 12: Plataforma de evaluación.

En la figura 13 se puede apreciar una secuencia de imágenes que describe el movimiento del actuador en 12 pasos. Si se compara esta secuencia contra la del modelado dinámico (figura 9), se podrá observar que la disposición del actuador está en diferente orientación ya que la gravedad impide tener la misma posición inicial para los casos virtual y real. Sin embargo, el actuador sigue la trayectoria estimada.

Como se ha mencionado, es importante conocer la relación esfuerzo-deformación durante la trayectoria del actuador. La figura 13 muestra dicha relación, la gráfica roja representa el modelado dinámico en Abaqus por análisis de elemento finito, mientras que la gráfica azul describe el comportamiento real del actuador. Nótese que el primer punto de la figura 12 se toma como la posición inicial (0,0); a partir de este punto se procesan las imágenes para obtener la trayectoria del marcador rojo que se encuentra en la parte inferior del actuador.

La figura 13 muestra la relación presión-deformación para los casos ideal y real, se tomaron 6 puntos importante de la trayectoria del actuador que van desde los 0KPa hasta los 55kPa. El análisis de imágenes ayuda a calcular la cinemática de manera experimental, durante el cierre de la trayectoria se puede observar que el actuador tiene un ligero roce con la base debido a la construcción

La tabla 2 muestra la relación carga-deformación para los análisis FEM e imágenes; se puede observar que la trayectoria se discretizó en 6 puntos para los cuales el actuador blando se deforma en los ejes X y Y en función de la carga de entrada. Los resultados experimentales son muy similares a los analíticos, la diferencia se debe principalmente a errores de manufactura. Sin embargo, el actuador blando se comporta como se estimó en el análisis de elemento finito.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 13. Secuencia de movimiento del actuador.

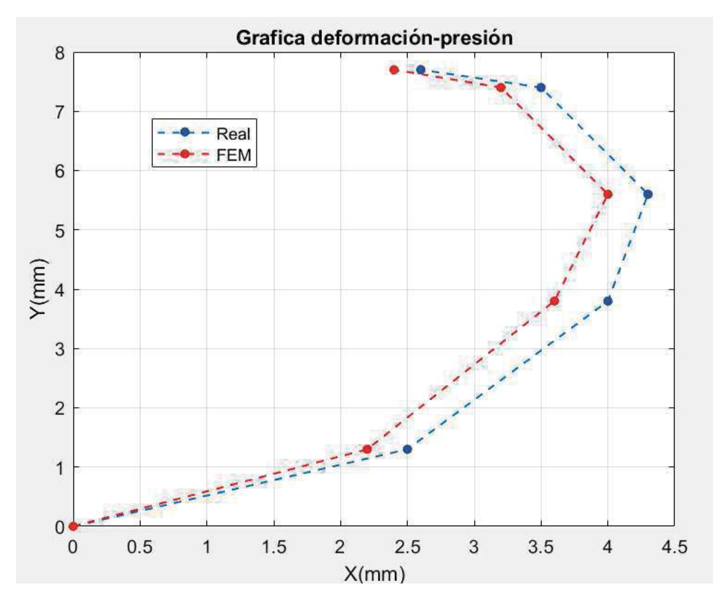


Figura 13: Relación deformación-presión por análisis de elemento finito y análisis de imágenes.

Tabla 2. Relación deformación-presión por análisis de elemento finito y análisis de imágenes.



Carga (kPa)	Deformación			
	FEM		Real	
	X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)
0	0	0	0	0
15	2.2	1.3	2.5	1.3
30	3.6	3.8	4.0	3.8
40	4.0	5.6	4.3	5.6
50	3.2	7.4	3.5	7.4
55	2.4	7.7	2.6	7.7

4. Conclusiones

Este artículo describe el diseño, modelado y fabricación de un actuador blando. Además de la evaluación de su desempeño real usando análisis de imágenes.

El actuador se diseñó a base de elastómeros líquidos, el modelado en Abaqus permite estimar la cinemática y dinámica del mecanismo planar. El comportamiento del actuador dependerá del material y su morfología, por ejemplo, si se tiene un actuador cilíndrico se obtendrá como trayectoria la expansión. El modelado permite conocer las variables que involucran al movimiento, posición, velocidad, aceleración y la presión necesaria para llegar a un punto.

El proceso de fabricación del actuador blando resulta ser de bajo costo, pues se utiliza una impresora 3D para la construcción de los moldes, el secado del material tarda un máximo de 4hrs. En poco tiempo se desarrolla un actuador de 1GDL.

El análisis de imágenes resulta ser una herramienta potente para evaluar el desempeño real del actuador, es importante conocer los desplazamientos del actuador en el plano en relación a la presión de entrada. Los resultados analíticos y experimentales varían debido principalmente a la manufactura.

La incorporación de materiales altamente flexibles puede potencialmente, reducir la complejidad mecánica involucrada en el diseño de robots, también ayuda a acelerar la evolución de los robots que puede interactuar con seguridad con humanos y ambientes naturales. Los robots blandos son una alternativa a la solución de la inspección en lugares confinados.

El diseño, construcción y evaluación de actuadores suaves es el preámbulo al desarrollo de robots blandos que sean capaces de desplazarse en espacios confinados, lugares de difícil acceso; debido a sus propiedades mecánicas pueden recibir grandes impactos sin sufrir daños. La principal aplicación de los robots blandos reside en la medicina.

Referencias

[1] C. Majidi. *“Soft Robotics: A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future”*, *Soft Robotics*, Vol. 1(1), pp. 5-11, 2013.
[2] R. H. Ewoldt. *“Extremely Soft: Design with Rheologically Complex Fluids”*, *Soft Robotics*, Vol. 1(1), pp. 12-20, 2014.
[3] J. Case, E. White, and R. Kramer. *“Soft Material Characterization for Robotic Applications”*, *Soft Robotics*, Vol. 2(2), pp. 80-87, 2015.
[4] A. Marchese, R. Katzschmann, and D. Rus. *“A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots”*, *Soft Robotics*, Vol. 2(1), pp. 80-87, 2015.
[5] A. Alar, V. Mohit, Y. Dian, and W. George. *“Soft, Rotating Pneumatic Actuator”*, *Soft Robotics*, Vol.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4(3), pp. 297-304, 2017.

[6] Q. Zhang, M. Dai, X. Ding and Z. Zhang. *“Characterization of multi-cavity composite soft pneumatic actuators”*, 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), pp. 1-6, Auckland 2017.

[7] N. Tan, X. Gu, H. Ren. *“Design, characterization and applications of a novel soft actuator driven by flexible shafts”*, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 122, pp. 197-21, 2018.

[8] Kuma, J. Liu, C. Christianson, M. Ali, M. Tolley, J. Aizenberg, D. Ingber, J. Weaver, and K. Bertoldi. *“A Biologically Inspired, Functionally Graded End Effector for Soft Robotics Applications”*, *Soft Robotics*, Vol. 4(4), pp. 317-323, 2017.

[9] N. Gunawardane, B. G. Medagedara, A. Madusanka and S. Wijesinghe. *“The development of a Gesture Controlled Soft Robot gripping mechanism”*, nternational Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), IEEE, pp. 1-6, Galle 2016.

[10] A. Marchese, D. Cagdas D. Onal, and D. Rus. *“Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators”*, *Soft Robotics*, Vol. 1(1), pp. 75-87, 2017.

[11] Z. Shen, J. Na and Z. Wang. *“A Biomimetic Underwater Soft Robot Inspired by Cephalopod Mollusc”*, *EEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 2(4), pp. 2217-2223, 2017.

[12] M. Robertson, H. Sadeghi, J. Florez, and J. Paik. *“A Biologically Inspired, Functionally Graded End Effector for Soft Robotics Applications”*, *Soft Robotics*, Vol. 4(1), pp. 23-33, 2017.

[13] Y. Sun, Y. S. Song and J. Paik. *“Characterization of silicone rubber based soft pneumatic actuators”*, International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ, pp. 4446-4453, Tokyo 2013.

[14] G. Runge, M. Wiese, L. Günther and A. Raatz. *“A framework for the kinematic modeling of soft material robots combining finite element analysis and piecewise constant curvature kinematics”*, 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), pp. 7-14, Nagoya 2017.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 6, pp. 58-69.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Dispositivo Auxiliar para la Rehabilitación de Hombro por Síndrome del Manguito Rotador

Diaz-Hernandez Octavio[1], Bernal Díaz Arcelia[1], Alanis Vázquez Eduardo[2] y Popoca Plutarco Carlos Orlando[3]

[1]Facultad de Estudios Superiores Aragón,
[2]Facultad de Ingeniería,
[3]Facultad de Medicina,
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

La rehabilitación de hombro es un problema de salud pública y se atiende a un gran número de personas por Síndrome del Manguito Rotador. Dado que los sistemas de salud pública han sido sobrepasados por la demanda de los servicios de terapia física, nos hemos dado a la tarea de diseñar una serie de dispositivos mecatrónicos para las afecciones más comunes, pero en este trabajo se presenta un modelo experimental capaz de mover el brazo del paciente en su grado de libertad de rotación interna y externa del hombro, como parte de la terapia cinestésica en pacientes con Síndrome del Manguito Rotador. Además, se instrumentó y controló el mecanismo para mover el brazo a baja velocidad, respetando los límites de movimiento anatómicos del brazo. Cabe recalcar que se necesita un médico terapeuta para valorar al paciente antes de usar el dispositivo y que el control manual aún debe usarse por el personal capacitado para las maniobras de rehabilitación. En consecuencia, el dispositivo aún debe permanecer dentro de un centro de salud o de un consultorio, aunque se prevé la posibilidad de que se puedan realizar tareas de terapia en casa y con supervisión remota.

Palabras clave: Rehabilitación de hombro. Mecatrónica, Síndrome del Manguito Rotador.

1. Introducción

Las lesiones en el hombro son comunes entre los adultos, siendo la tercera causa de dolor entre las afecciones en el sistema músculo esquelético, alrededor del 10% de la población general de adultos experimentara un episodio de dolor de hombro en su vida. Este tipo de dolor afecta las actividades de la vida diaria, incluyendo el buen descanso por la noche, ya que interrumpe el sueño con una mala postura. Normalmente, los pacientes buscan atención médica y se acercan al nivel de atención básica. Los episodios de dolor agudo de hombro se resuelven naturalmente aun sin tratamiento después de uno a tres meses a partir de su inicio [1]. No obstante, el paciente con lesión de hombro debería ser valorado por especialistas, debido a que es importante intervenir tempranamente cualquier lesión posible para prevenir la progresión a dolor crónico. Además de que la etiología del hombro doloroso es múltiple y se puede agravar con factores de riesgo tales como el tipo de tratamiento usado en la fase aguda y factores ocupacionales [2].

Una de las afecciones más comunes de hombro es el Síndrome del Manguito Rotador (CIE[1]: M75.1), donde el manguito de los rotadores es una integración estructural y coordinación funcional de cuatro músculos escapulohumerales que se insertan en la tuberosidad humeral: supraespinoso, infraespinoso, redondo menor y subescapular. Los tendones de éstos cuatro músculos, en su porción distal, se asientan sobre un espacio curvo en el plano frontal y sagital, lo que condiciona una distribución peculiar cuando son sometidos a tensión. La alteración de la función del manguito rotador ocasionará un ascenso de la cabeza humeral con el choque secundario del manguito contra el arco coracoacromial, pudiéndose llegar al atrapamiento o colisión subacromial [3].

[1] Clasificación Internacional de las Enfermedades

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Las lesiones del manguito rotador son de origen intrínseco y extrínseco. Como se observa en la Tabla 1, las lesiones intrínsecas pueden ser degenerativas, traumáticas y/o reactivas y las extrínsecas por atrapamiento primario o secundario.

Tabla 1: Etiología de las lesiones del Manguito Rotador [Tomado de 1]

Causa extrínseca	Causa Intrínseca
Atrapamiento primario • Forma del acromión • Inclinación del acromión • Osificación del acromión • Síndrome de salida torácica	Degenerativa • Edad • Hipovascularización • Desgarro intrasustancia
Atrapamiento secundario • Factores capsuloligamentosos • Factores traumáticos • Factores degenerativos • Disfunciones neuromusculares • Enfermedades inflamatorias • Procesos yatrogénicos	Traumática • Aguda • Macrotrauma • Crónica • Sobrecarga • Fracaso de la fuerza intencional del Manguito Rotador
	Reactiva • Calcificación

Sería arriesgado diseñar un sistema general que intente incluir todos los posibles tratamientos para un hombro doloroso, de forma que los autores pensamos que es posible implementar un sistema de terapia física que ayude al paciente a recuperar la movilidad de su hombro y que en particular se trabaje con la estructura anatómica del manguito de rotadores. Además, pensamos que esto puede facilitar el trabajo del fisioterapeuta el hecho de contar con un sistema especializado para uno o dos ejercicios particulares que auxilien en la rehabilitación. De tal forma que en este trabajo se propuso un sistema de máximo dos grados de libertad que ayude al paciente a recuperar la movilidad del manguito de rotadores, específicamente para mejorar la movilidad de rotación interna y externa en el hombro del paciente. Cabe aclarar que la valoración del paciente es labor del médico y se intenta auxiliar su labor con este tipo de proyectos.

2. Antecedentes

2.1 Anatomía del Manguito Rotador del hombro

Se llama así al complejo anatómico constituido por los tendones correspondientes a cuatro músculos [4], y que se fusionan con la cápsula subyacente al insertarse finalmente en el Tubérculo mayor del húmero (Ver Figura 1):

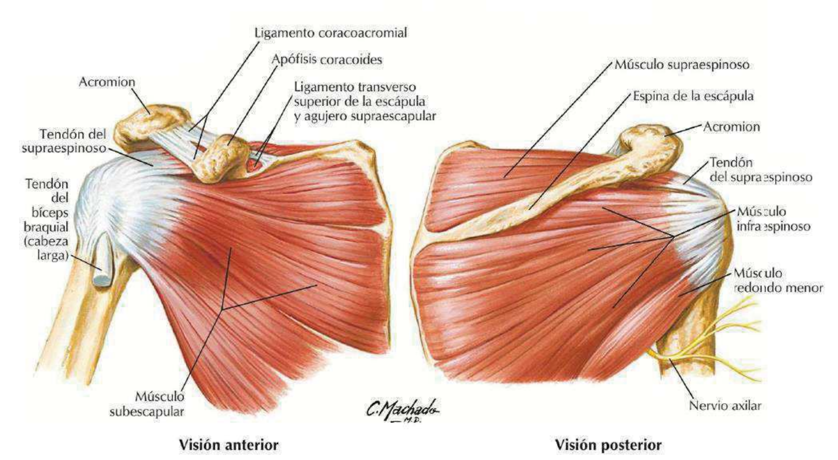


Figura 1. Músculos del manguito de los rotadores. Vista anterior y posterior [Tomado de 4].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



A continuación, se describen algunos de las estructuras anatómicas de interés para este trabajo. *Músculo subescapular*: nace en la cara anterior en la fosa subescapular y su tendón se inserta en el Tubérculo mayor humeral. Recibe inervación de los nervios subescapulares superior e inferior. *Músculo supraespinoso*: tiene su origen en la fosa supraescapular, en la cara posterior del omóplato y su tendón pasa en su recorrido por debajo del arco acromioclavicular y se inserta en la parte superior del tubérculo mayor humeral. Se encuentra inervado por el nervio supraescapular después de pasar por la escotadura supraescapular. *Músculo infraespinoso*: tiene su origen en la cara posterior de la fosa subescapular y su tendón se inserta en la cara posteroexterna del Tubérculo mayor. Se encuentra inervado por el nervio supraescapular después de pasar por la escotadura espino-glenoidea. *Músculo redondo menor*: tiene su origen en la cara inferior externa de la escápula y se inserta en la cara inferior del Tubérculo mayor del húmero (troquíter). Se encuentra inervado por una rama del nervio circunflejo [4].

2.2 Diagnóstico

Para llegar tratar al paciente con esta lesión y que pueda intervenir un sistema mecanizado, se debe evaluar correctamente a la persona a través de su *Historia Clínica* donde se buscará intencionalmente actividades de riesgo como son: movimiento constante de lanzamiento, actividades laborales relacionadas con movimientos vibratorios y actividades donde se mantenga elevado el brazo por arriba del hombro; sin dejar de lado la edad del paciente, ya que a mayor edad mayor probabilidad de lesión de hombro y antecedentes de comorbilidades como artritis reumatoide, diabetes mellitus, sobrepeso y obesidad. El inicio de los síntomas es variable, pueden aparecer de forma aguda, tras un traumatismo o un esfuerzo brusco, principalmente movimiento de lanzamiento, o vibratorio, aunque la mayoría de los pacientes relatan una clínica de largo tiempo de evolución con progresión de los síntomas. La patología del manguito de los rotadores va asociada fundamentalmente a tres síntomas: dolor de hombro anterior y lateral de predominio nocturno que puede o no llegar a irradiar a cuello, debilidad principalmente a la elevación y limitación de la movilidad en la abducción, rotación interna y externa. Además, el médico necesita procurar hacer un *Examen Físico*, donde a la inspección se encontrara asimetría, anomalías morfológicas como la presencia de atrofia de la fosa del supraespinoso e infraespinoso y también del músculo deltoides postura antiálgica y dependiendo de la cronicidad signos de inflamación locales; a la palpación se puede encontrar pacientes con dolor en el hombro sobre la cintura escapular principalmente en el acromion anterior y en la zona anterior del Tubérculo mayor del húmero, masas musculares y contracturas con puntos gatillo. En los pacientes con lesión crónica del manguito, se debe de aplicar maniobras especiales. Las maniobras de exploración constituyen una importante ayuda para el diagnóstico, sobre todo el signo de Neer "*impingement*" (se realiza una elevación del brazo mientras el acromion es deprimido hacia abajo). La aparición de dolor es considerada como positiva. El signo de Hawkins (con el hombro flexionado hacia delante 90º, se provoca una rotación interna del brazo contra resistencia). Si produce dolor se considera positivo. La maniobra de Patte, es igual que el anterior, pero con rotación externa contra resistencia. Si reproduce las molestias es positivo. La maniobra de Jobe: se realiza abducción contra resistencia a partir de la posición de 30º de antepulsión, más rotación interna forzada y más extensión completa del codo. Estas son las más importantes, aunque hay muchas más. Otros estudios complementarios a la clínica antes descrita están los estudios de imagen como la radiografía simple de hombro, oblicua y lateral para descartar fracturas o luxaciones, ecografía, resonancia magnética, por mencionar algunos [5].

2.3 Rehabilitación

La rehabilitación del hombro está orientada al diagnóstico establecido por el médico rehabilitador o terapeuta especializado ya que el diseño de un programa de rehabilitación debería tener en cuenta varios factores: El grado y tipo de alteración mecánica, la cronicidad del problema, la fuerza y resistencia del manguito de los rotadores y de la musculatura escapular, la flexibilidad de las partes blandas alrededor del hombro y el nivel y tipo de actividad previsto tras la rehabilitación. Las técnicas de movilización articular se pueden utilizar para evitar la rigidez articular y las deficiencias de amplitud del movimiento pasivo. En la literatura especializada se recomiendan los *Ejercicios pendulares (ejercicios de Codman o Chandler)*, la *Movilización pasiva*, en decúbito supino (acostado

ISBN: 978-607-9394-14-1.



boca arriba) o sedestación: en flexión, según tolerancia, entre 0º y 120º. Y para la *Rotación externa e interna* en el plano escapular, máximo 20º y 45º respectivamente, 4 veces al día, 20 repeticiones. El objetivo principal de la rehabilitación del Síndrome del Manguito Rotador es aumentar los rangos de movilidad una vez completada la evaluación del terapeuta y ante lesión del manguito rotador se puede encontrar diversas series de ejercicios de los cuales se utilizarán en una primera etapa la movilidad pasiva, o activa asistida donde para fines de este artículo se describirá únicamente la rotación interna y externa cabe recalcar que el movimiento el cual dispone el dispositivo es el movimiento de rotación interna y externa donde los músculos que intervienen es el infraespinoso y el redondo menor como rotación externa; el subescapular funciona como rotador importante del brazo, dorsal ancho y redondo mayor para la rotación interna [6].

2.4 Dispositivos mecánicos para la rehabilitación de hombro

Para este tipo de lesiones existen algunos dispositivos que se distribuyen de manera común para apoyar al paciente a efectuar su rehabilitación, con el fin de brindar fortaleza muscular, equilibrio y tono muscular entre los cuales encontramos los siguientes:

- Rueda o timón de hombro. Este es un dispositivo mecánico que facilita la rehabilitación de hombros, brazos, codos y muñecas de las personas con alguna discapacidad, al poderse adaptar al tamaño y necesidades de cada paciente. La rueda de hombro mejora la fuerza muscular, la flexibilidad articular y la coordinación motriz en personas que sufren alguna discapacidad en los miembros superiores del cuerpo. Se coloca fijo a la pared mediante un soporte móvil que permite regularla en altura para adaptarse a las dimensiones del paciente. Permite el complejo movimiento del hombro y escápula en rotación [7].

- Escalerilla de hombro. La escalerilla de dedos es utilizada primordialmente para aumentar la amplitud de movimientos en el hombro, sobre todo realizando flexión del miembro superior con el codo en extensión y después llevando a cabo la abducción [8].

- Barras suecas para terapia física. Es una escalera en posición horizontal que se utiliza para ejercicios generales con el fin de corregir defectos posturales, también se utiliza para estimular la bipedestación, el equilibrio y el fortalecimiento muscular en esta posición. El travesaño superior permite hacer ejercicios de barra con las manos. Los travesaños están construidos de fina madera dura en forma de óvalo. Se pueden combinar varias secciones para formar una unidad tan larga como se requiera. Unidad versátil para clínicas de medicina deportiva, gimnasios, escuelas y hospitales. Se pueden realizar ejercicios para mejorar el rango de movimiento de hombro con el paciente sentado o parado. Para el fortalecimiento de músculos torácicos, pélvicos y de espalda [9].

Asimismo, existen distintos desarrollos en el área de la robótica para rehabilitar el miembro toráxico (hombro, brazo y antebrazo) [10-18], así como otros dispositivos de relevancia son los exoesqueletos [19-25] que se montan sobre el paciente para realizar tareas, por mencionar algunos ejemplos. Estos desarrollos suelen ser de propósito general, es decir, se pueden realizar múltiples ejercicios, aunque son estructuras de gran tamaño y se usan en lugares de alta especialidad, además resultan costosos tanto en su fabricación, su mantenimiento y en la capacitación del personal que los maneja. Para nuestro trabajo se ha propuesto que sea de bajo costo, fácil de transportar, que el control sea intuitivo y que eventualmente sea manejado en el domicilio del paciente.

3. Desarrollo

En esta sección del trabajo se contemplan aspectos del proceso realizado para obtener un modelo funcional del sistema mecatrónico para la rehabilitación del hombro en pacientes que padecen el Síndrome del Maguito Rotador. Como se ha dicho, se orientará el desarrollo hacia el ejercicio de movilidad del hombro en sus grados de libertad de rotación interna y externa (Ver Figura 2).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



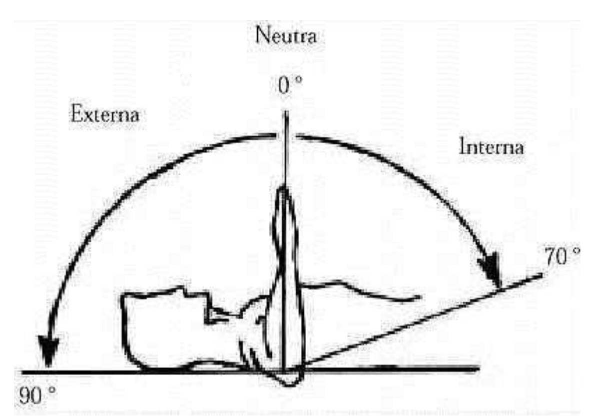


Figura 2. Rotación interna y externa en el plano sagital [Tomado de 26]

En primer lugar, se presentan los bocetos de donde se partió para el modelo propuesto. En la Figura 3 se muestran dos engranes con los que se buscó aumentar el par del motor.

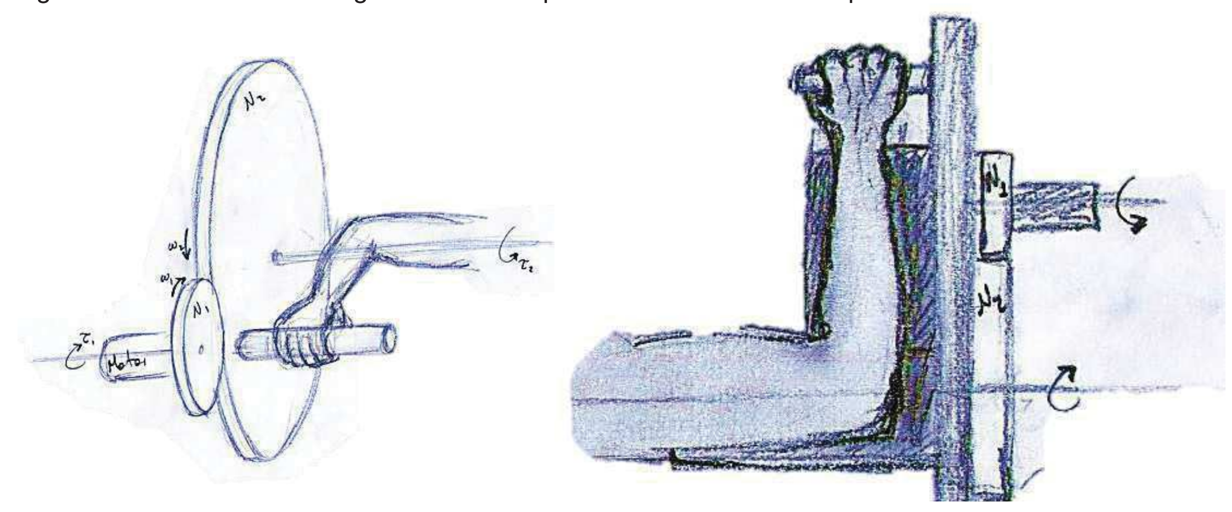


Figura 3. Bocetos iniciales del concepto a realizar.

Inicialmente se diseñó el mecanismo con ayuda de los trenes de engranes, los cuales son elementos ampliamente ocupados para transferir y transformar el movimiento rotacional. Se emplean cuando se necesita un cambio en la velocidad o en el par motor de un dispositivo que está girando.

Los engranes transmiten el movimiento rotacional entre ejes paralelos y entre ejes inclinados entre sí. Asimismo, cuando dos engranes están dentados, el mayor se llama corona o engrane y el menor piñón. Los engranes que se usan para conectar ejes paralelos tienen dientes rectos, es decir, los ejes se cortan en líneas axiales paralelas al eje. Este tipo de engrane se conoce como engrane recto.
[27].

Para este primer desarrollo se consideraron dos engranes conectados, A y B. El engrane A tiene 20 dientes (N_A) y el B 40 dientes (N_B), el engrane A gira dos veces en el mismo tiempo que el engrane B gira una vez. Por lo tanto, la velocidad angular del engrane A, ω_A, debe ser el doble de la del engrane B, ω_B, dada la ecuación 1:

$$\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{N_B}{N_A} = \frac{40}{20} = 2 \qquad (1)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El término relación de engranaje designa la relación entre las velocidades angulares de un par de engranes conectados [27].

Posteriormente se muestra un modelo en tres dimensiones, realizado en un programa de diseño asistido por computadora (Figura 4).

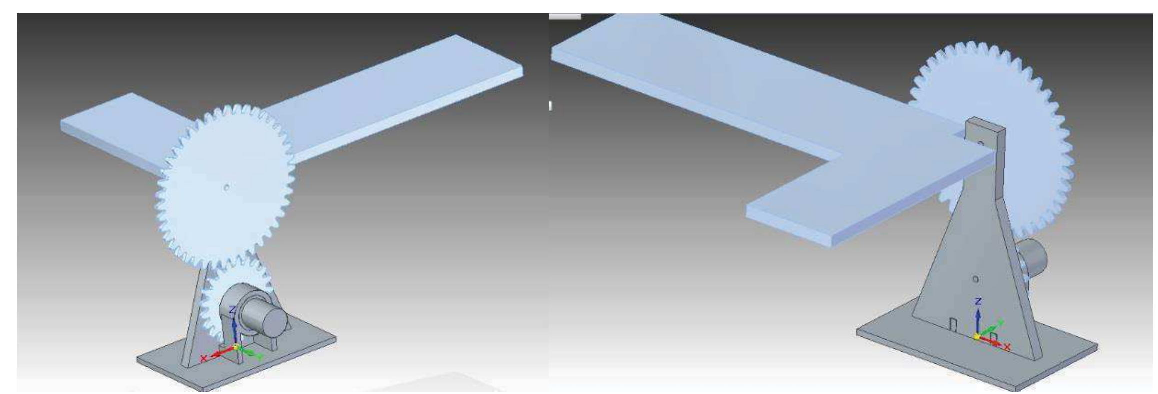


Figura 4. Modelo virtual del concepto a realizar.

Posteriormente, se procedió a la fabricación del concepto para realizar pruebas y observar sus características, mejoras o problemas que pudiera presentar. Se usó manufactura aditiva para algunas de las piezas, entre ellas, los engranes. Se usó el termoplástico conocido como PLA, siendo su nombre químico el ácido 2-hidroxipropanoico, el cual es una opción común y económica para realizar un prototipo rápido como el que se pretende realizar. Se usó un motoreductor de corriente directa convencional sin encoder (modelo Pololu 37Dx52L 30:1), se pueden encontrar entre sus especificaciones a 12 [V] las siguientes: 350 [RPM], 8 [kg-cm] (0.7845 [Nm]) y 5 [A] a rotor parado. Ver más información en [28].

A continuación, se muestran imágenes de un primer modelo del engranaje y su configuración.

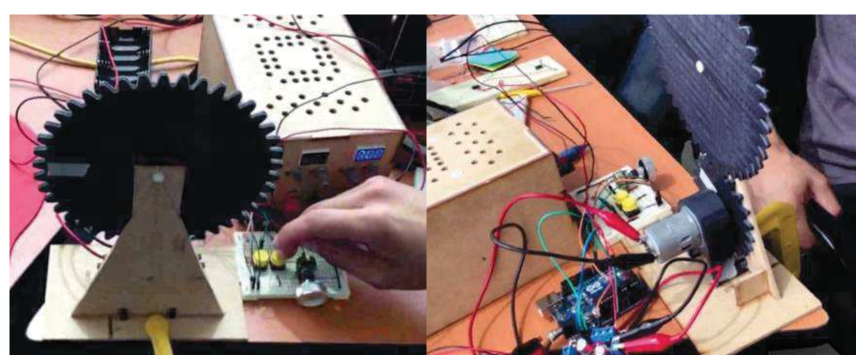


Figura 5. Modelo funcional del concepto.

De este modelo se obtuvieron las siguientes observaciones: 1) La velocidad del motor es demasiado alta para la velocidad requerida en rehabilitación a pesar de la reducción por engranes, 2) La potencia del motorreductor aún con engranes no fue suficiente para levantar el brazo de una persona. 3) La tendencia a caerse del sistema es alta al tener un sólo soporte vertical, 4) La altura del eje del modelo con respecto a la mesa es de 16 [cm], la cual corresponde a la altura promedio del hombro cuando un adulto se sienta sobre una silla de 43 [cm] y tiene una mesa o escritorio a 68 [cm] del suelo, sin embargo, esta altura necesita modificarse para personas con medidas diferentes, así como adaptarse a distintos mobiliarios.

A continuación, se describen algunos cambios para este concepto. Se propuso una caja de engranes que aumente el par de salida del motorreductor, y agregar un eje salida acorde a las necesidades.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se consideraron algunas medidas del cuerpo humano para el diseño del sistema. Según Osterkamp [29], el peso del brazo tiene las siguientes proporciones respecto al cien por ciento del cuerpo humano:

Tabla 2. Porcentaje de peso partes del brazo

Parte del cuerpo	Porcentaje [%]
Brazo completo	5
Brazo	2.7
Antebrazo	1.6
Mano	0.7

Considerando que el peso promedio nacional del género masculino es de 74.8 [kg] [30] y con la ecuación 1 se calcula el peso o carga a la que se someterá el mecanismo. Tomaremos este dato como el de referencia para el ejercicio de los cálculos.

$$Peso = masa\ del\ brazo \cdot gravedad \tag{1}$$

Donde, masa del brazo (aproximado) = 74.8 * 0.05 = 3.74 [kg], gravedad = 9.78 [m/s^2]. De tal modo que el resultado es P = 36.58 [N].

Considerando que el Par T que requiere el motor se puede estimar con la ecuación 2. Donde L es la longitud de la plataforma que sostendrá al brazo del paciente.

$$T = Peso \cdot \text{Longitud}\ [Nm] \tag{2}$$

Se estudiaron algunos casos para estimar el Par necesario que sería requerido y en la Figura 6, se puede ver uno de ellos, tomando como P como el peso del brazo y a L con un valor de 30 cm (con base al modelo propuesto):

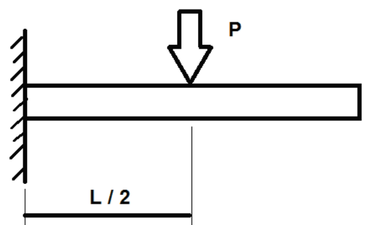


Figura 6. Representación de la carga del brazo sobre un eje.

Realizando los cálculos, se tiene que el par requerido es 5.49 [Nm] para estas suposiciones. Por su parte, dado que se usaría el motorreductor para el modelo anterior tiene una capacidad de 0.7845 [Nm], se ha propuesto una caja de engranes adicional cuya relación entrada/salida es de 8/1, con el cual se tiene un valor de T= 6.28 [Nm] aproximadamente.

Se usaron las siguientes consideraciones o *principios básicos de diseño de engranes* para obtener un tren de engranes compuesto [27]. El término tren de engranes compuesto se refiere a un tren de engranes cuando dos de ellos están montados en un eje común. Se hizo uso de la ecuación 2, donde se considera la relación de engranaje total G.

$$G = \frac{\omega_A}{\omega_D} = \frac{\omega_A}{\omega_B} \times \frac{\omega_B}{\omega_C} \times \frac{\omega_C}{\omega_D} = \frac{\omega_A}{\omega_B} \times \frac{\omega_C}{\omega_D} \tag{2}$$

Donde el par de fuerza T_A por velocidad de giro ($T_A \cdot \omega_A = T_D \cdot \omega_D$), se consigue un par a la salida de la transmisión (T_D) mayor que el de entrada ($T_D > T_A$) [27].

En la Figura 6 se puede ver el tren de engranes diseñado.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



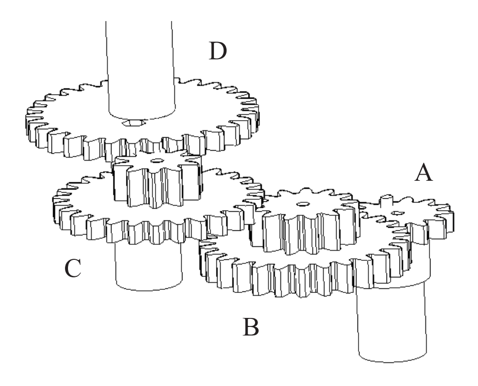


Figura 6. Modelo de la caja de engranes.

A la caja de engranes se le agregó un marco que aporta la rigidez y sostén del mecanismo. Ver Figura 7.

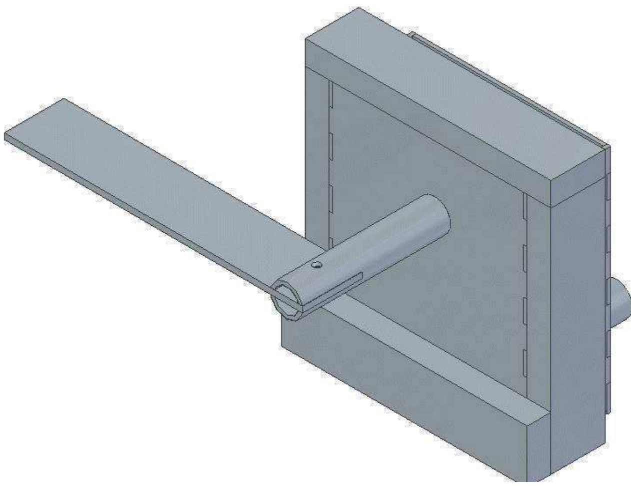


Figura 7. Modelo propuesto con marco.

Por otro lado, también fue requerido instrumentar los ángulos máximo y mínimo, donde el eje vertical fungió como 0 grados y se colocaron sensores a 90 grados y a -70 grados respectivamente. Asimismo, se realizó la etapa de potencia para el motor y el control. Para el motor se usó un módulo de puente H (modelo L298) lo cual ayuda a que los motores reciban la corriente adecuada provista por una fuente externa de alimentación, además del sentido de giro. El control fue realizado con una tarjeta de Arduino UNO [31]. Las señales de control de movimiento provienen de un control manual (Ver Figura 8).

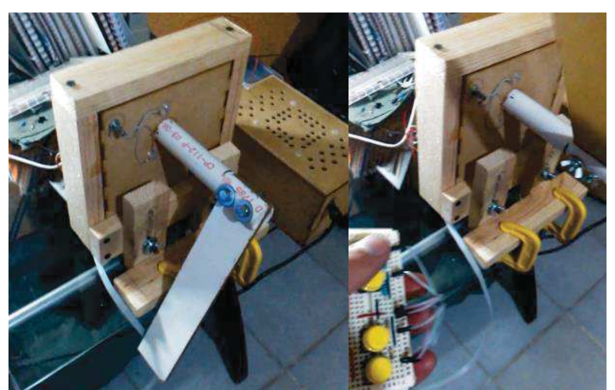


Figura 8. El proyecto mostrando diferentes ángulos de movimiento.

Los botones que el control manual tiene configurados son tres:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



1) Movimiento hacia arriba: el soporte se mueve hacia arriba mientras el usuario mantenga pulsado el botón.

2) Movimiento hacia abajo: el soporte se mueve hacia abajo mientras el usuario mantenga pulsado el botón. Debido a que el peso del brazo, sumado a la fuerza de gravedad aceleran el desplazamiento hacia abajo, la rutina incluye un sistema de ajuste para contrarrestar este efecto.

3) Calibración (Reinicio). Se coloca en una posición inicial en cero grados (se debe realizar sin carga en el soporte).

Como se ha comentado, el control electrónico se realizó con un microprocesador Atmega 328P en la placa de desarrollo Arduino UNO [31], en el cual se programaron lo algoritmos de movimiento como se ilustra en la Figura 9.

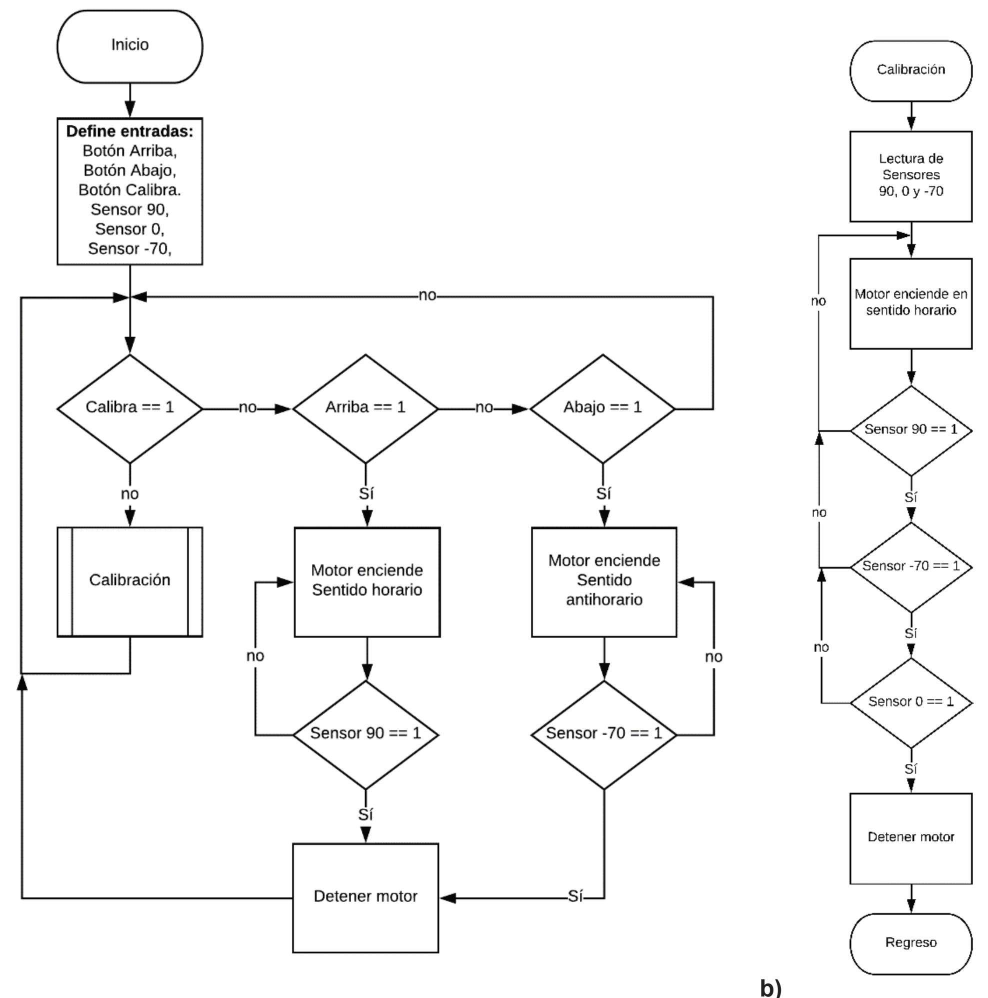


Figura 9. Diagrama de flujo de a) el programa principal, y b) la subrutina "Calibra"

4. Resultados

Se realizaron pruebas con personas sentadas junto al dispositivo montado sobre una mesa. Se realizaron repeticiones desde 0 a 90 grados, posteriormente de 90 a 0 grados, después de 0 a -70

ISBN: 978-607-9394-14-1.



grados y de -70 a 0 grados, para reiniciar el proceso. Para esto se debe considerar que si existiera dolor (en un paciente con Síndrome de Manguito de los Rotadores) no se llegará hasta los ángulos máximos. Razón por la cual se ha mantenido el control manual (con botones) en caso de que se deba parar el proceso y se debe caracterizar los ángulos a los que puede llegar cada paciente. A continuación, se muestran algunas capturas del video en diferentes ángulos del brazo del voluntario (Ver Figura 10).

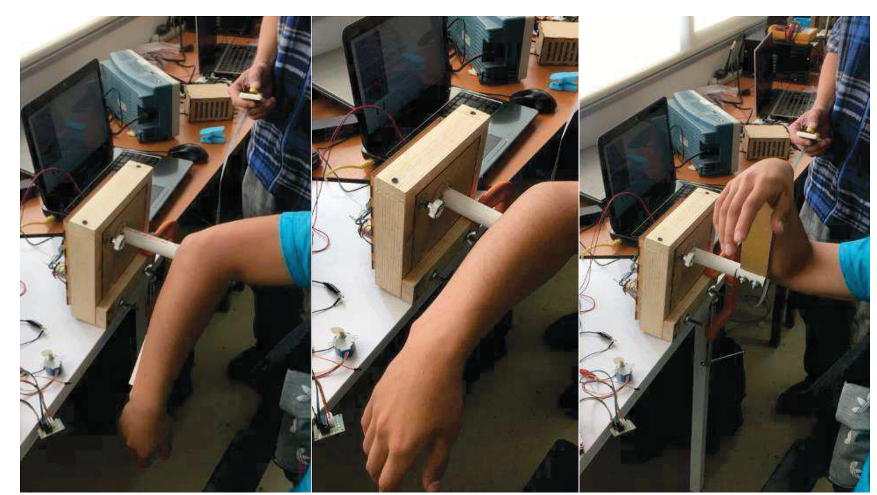


Figura 10. Captura de pantalla del video para captar en movimiento al dispositivo.

Se observó que se tiene un alto consumo de corriente del motor: las lecturas registradas en la fuente de alimentación a 5 [V] se midieron aproximadamente de 2.3 [A]. En la Tabla 3 se ejemplifican una serie de resultados para un usuario de 70 [kg]. La corriente fue leída a cada 10 grados, con ayuda de multímetro y transportador. Cabe resaltar que el par fue calculado, empleando la ecuación 2 y el ángulo.

Tabla 3. Resultados para un rango de movimiento completo.

Ángulo [°]	Corriente [A]	Par estimado* [Nm]
90	0.0000	0.0000
80	0.3982	1.2742
70	0.7843	2.5097
60	1.1465	3.6689
50	1.4740	4.7167
40	1.7566	5.6211
30	1.9859	6.3548
20	2.1548	6.8954
10	2.2583	7.2264
0	**2.2931**	7.3379
-10	2.2583	7.2264
-20	2.1548	6.8954
-30	1.9859	6.3548
-40	1.7566	5.6211
-50	1.4740	4.7167
-60	1.1465	3.6689



-70	0.7843	2.5097

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso un modelo de mecanismo capaz de mover el brazo en su grado de libertad de rotación interna y externa del hombro. Se puede mover a los ángulos máximos permitido por la articulación sana. Se instrumentó el mecanismo para asegurar que no sobrepase dichos ángulos. Se manejó con un microcontrolador convencional sin usar todo el potencial que tiene, por ejemplo, un algoritmo automático de rehabilitación. Se logró realizar una mejora al sistema mecánico para aumentar el par requerido por el motor y que, a su vez, disminuyera la velocidad del movimiento de tal forma que no sea un movimiento súbito para el paciente.

Los movimientos de rotación interna y externa en el hombro activan tres de los cuatro músculos del manguito de rotadores (infraespinoso, subescapular y redondo menor), lo que lo convierte en un ejercicio fundamental en tratamientos de rehabilitación o como medida preventiva para evitar lesiones mayores de hombro o bien, que el paciente tenga dolor crónico de hombro.

Hace falta trabajar sobre las normas para el desarrollo de dispositivos médicos, posibles rutinas semiautomáticas con asistencia de terapeuta, así como una interfaz gráfica donde se pueda monitorear variables de ángulo y de velocidad, así como el registro de sesiones y progreso de la rehabilitación. Además de mejorar el sistema de ajuste al mobiliario médico, ya sea una mesa, la cama del paciente, de tal forma que se ajuste a otros ambientes o condiciones de trabajo. Se deben mejorar los sistemas de medición de ángulos dado que pueden perder su calibración fácilmente. Se están haciendo mejoras tales como el rediseño e implementación del prototipo con materiales adecuados para evitar deformaciones, por ejemplo, en el rubro de los materiales, hace falta hacer estudio de elemento finito.

Los sistemas de rehabilitación de este tipo se están trabajando por todo el mundo, los beneficios de contar con sistemas mecatrónicos de rehabilitación son: 1) la reducción de la fatiga de los terapeutas, 2) poder brindar atención a mayor número de pacientes de forma simultánea, 3) valoración objetiva de los pacientes, 4) registro de sesiones y del avance o eficiencia de la rehabilitación, 5) la flexibilidad para dar atención de diferentes tipos de pacientes, entre otras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Estudios Superiores Aragón, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME con clave PE110618 y UNAM-DGAPA-PAPIIT con clave IT102218.

Referencias

[1] CENETEC. Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. 2013. Diagnóstico y Tratamiento del Síndrome del Manguito Rotador. México: Secretaría de Salud; 2013.
[2] Van der Heijden GJM. *Shoulder disorders: a state of the art review*. Bailliere's Clinical Rheumatology, 13: 287–309. 1999.
[3] Bigliani LU, Mornoson DS, April EW, *The morphology of the acromion and its relationship to rotator cuff tears*, Orthop Trans, 10:228. 1986.
[4] Netter, F. *Atlas de anatomía humana*. Masson, España, 4 edición. 2007
[5] Sánchez, F., Llinares, B., Cruz, J. *Patología del manguito de los rotadores en el ambiente laboral*; Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona; 2009. Dirección digital: http://hdl.handle.net/2445/7061
[6] González, R., Alamillo, J., Giménez, J., Loscos, P., Ruiz, J. *Guía para el abordaje del hombro doloroso: Tratamiento Rehabilitador tras la Cirugía Artroscópica del manguito de los rotadores*. Enfoque Editorial S.C., España, 2017

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[7] VidaPlena. *Timón de Hombro*, pagina web consultada en marzo de 2018, disponible en [http://tens-vidaplena.com/catalogos/profesionales/mecanoterapia-y-ejercicio/rueda-o-timon-de-hombros-meca0023]

[8] VidaPlena. *Escalerilla de dedos*, pagina web consultada en marzo de 2018, disponible en <http://tens-vidaplena.com/catalogos/profesionales/mecanoterapia-y-ejercicio/escalerilla-de-dedos-meca0032>

[9] GrupoMedicaStore. *Barra Sueca*, página web consultada en marzo de 2018, disponible en https://grupomedicastore.mx/venta-de-barras-para-rehabilitacion-fisica-en-mexico/146-venta-de-barras-suecas-para-terapia-fisica-en-mexico.html

[10] Ren, W., et al., *kinect-based skeleton-matching feedback for motor rehabilitation: transient performance effect of shoulder training.* Journal of Mechanics in Medicine and Biology, **16**(3). 2016.

[11] Diaz-Hernandez, O. and S.M. Garcia-Villalpando. *Mechatronic system for rehabilitation of patients after a stroke*. in 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON). 2017.

[12] Zhang, J. and C.C. Cheah, *Passivity and Stability of Human Robot Interaction Control for an Upper-Limb Rehabilitation Robot*. 2015.

[13] Valles, M., et al., *A 3-PRS parallel manipulator for ankle rehabilitation: towards a low-cost robotic rehabilitation*. 2015.

[14] Xu, W., Chu, B., Rogers, E. *Iterative learning control for robotic-assisted upper limb stroke rehabilitation in the presence of muscle fatigue.* Control Engineering Practice, 31: p. 63-72. 2014.

[15] Zhang, J., Cheah, C., Collins, S. *Stable human-robot interaction control for upper-limb rehabilitation robotics.* Karlsruhe, Germany: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2013.

[16] Keller, U., et al. *ChARMin: A robot for pediatric arm rehabilitation*. Karlsruhe, Germany: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2013.

[17] Cao, D.F., et al. *Structure design and analysis of kinematics of a 6-DOF upper-limbed rehabilitation robot*. Dalian, China: Trans Tech Publications Ltd. 2013.

[18] Lo, A., et al., *Robot-Assisted Therapy for Long-Term Upper-Limb Impairment after Stroke.* New England Journal of Medicine, 362(19): p. 1772-1783. 2010.

[19] Alavi, N., et al. *Bimanual elbow exoskeleton: Force based protocol and rehabilitation quantification.* Milan, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2015.

[20] Wang, L., Yin, Z., Sun, Y. *The analysis and control of exoskeleton upper-limb rehabilitation robot.* Key Engineering Materials, 572(1): p. 619-623. 2014.

[21] Cempini, M., et al. *Kinematics and design of a portable and wearable exoskeleton for hand rehabilitation.* 2013. Seattle, WA, United states: IEEE Computer Society.

[22] Cao, D.F., et al. *Structure design and analysis of kinematics of a 6-DOF upper-limbed rehabilitation robot.* 2013. Dalian, China: Trans Tech Publications Ltd.

[23] Yu, M., et al. *Kinematics analysis of exoskeletons rehabilitation robot based on ADAMS.* 2012. Xiamen, China: Trans Tech Publications.

[24] Perry, J.C., Powell, J., Rosen, J. *Isotropy of an upper limb exoskeleton and the kinematics and dynamics of the human arm.* Applied Bionics and Biomechanics, 2009. 6(2): p. 175-191.

[25] Mistry, M., Mohajerian, P., Schaal, S. *An exoskeleton robot for human arm movement study.* in Intelligent Robots and Systems, (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. 2005.

[26] Bartolomé, J. *Isocinéticos en el hombro*, Fisioterapia, Vol. 20. Núm. 90. pp 9045-57,1998.

[27] Bolton, W. *Mecatrónica - Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. Alfaomega. 5 ed. México. 2013

[28] Pololu. *30:1 Metal Gearmotor 37Dx52L mm*. página web consultada en marzo de 2018, disponible en: www.pololu.com/product/1103

[29] Osterkamp L., Current perspective on assessment of human body proportions of relevance to amputees, J Am Diet Assoc. 95:215-218, 1995.

[30] CANAIVE, Cámara Nacional de la Industria del Vestido) *¿Cuánto mide México? El tamaño sí importa*, página web consultada en febrero de 2018, <www.muyinteresante.com.mx/preguntas-y-respuestas/12/02/09/medidas-poblacion-mexicana> 2010

[31] Arduino UNO. página web consultada en marzo de 2018, disponible en: www.arduino.cc/

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 70-79.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sistema de Identificación Facial con Raspberry pi 3B Mediante Coeficientes de Correlación y Filtro Wiener

Candelaria Cruz Abraham, Moreno Vazquez Jose de Jesus, Sartorius Castellanos Aldo Rafael y Hernandez Nieto Marcia Lorena

Instituto Tecnológico de Minatitlán, Veracruz, México
centrino_wi@hotmail.com

Resumen

El presente artículo se realiza con la tarjeta de desarrollo raspberry pi 3 B junto con el módulo de cámara raspberry modelo V1 como sistema de adquisición de las fotografías de los sujetos de estudio con la conectividad Ethernet de Matlab el cual cuenta con un algoritmo para la identificación de personas mediante reconocimiento de rostro utilizando el método de Viola-Jones para la detección de rostros en una imagen tomada bajo condiciones exteriores con iluminación no controlada y gestos improvisados, posteriormente se utiliza el filtro Wiener para reducir considerablemente el ruido en la imagen adquirida y finalmente mediante un análisis de los coeficientes de correlación normalizados se identifica a la persona en la fotografía, también se realiza un análisis de curvas ROC para comprobar la efectividad del algoritmo.

Palabras clave: Facial, Reconocimiento, Viola-Jones, Raspberry pi, Matlab, Filtro Wiener, Coeficientes de correlación.

1. Introducción

El reconocimiento de rostros se define como la búsqueda de todas las caras en una imagen fija o una secuencia de video. La identificación o la autenticación se pueden hacer comparando las caras encontradas con las de la base de datos [3]. En este artículo abordaremos la problemática de la identificación con gestos improvisados y el ambiente no controlado, en este ambiente se realiza al exterior donde las variaciones climatológicas afectan a la persona además al ser un lugar público el escenario tiende a ser cambiante.Para los gestos se procura que los sujetos de pruebas realicen una serie de gestos improvisados, dentro de los cuales incluyen perfiles e inclinaciones de rostro en un rango de 90° a -90° para perfiles y de 45° a .45° para inclinaciones de rostro, también tomas en movimiento, sonrisas, rostro serio y cambios por viento. Un detector de rostros debe decir si una imagen de tamaño arbitrario contiene un rostro humano y, de ser así, dónde está [8], hay muchos métodos altamente efectivos de identificación y verificación del usuario basados en características biométricas [3]. Dado que ninguna distribución objetiva puede describir la probabilidad previa real para que una imagen determinada tenga una cara, el algoritmo debe minimizar las tasas de falsos negativos y falsos positivos para lograr un rendimiento aceptable [8], todos requieren alguna cooperación entre el usuario y el sistema [3]. La detección de la cara de Viola y Jones es ampliamente utilizada debido a su eficiencia, robustez y precisión en la identificación de rostros en entornos no controlados [2]. Utiliza un proceso para el entrenamiento de un clasificador extremadamente simple y eficiente que puede ser utilizado como un operador de atención "supervisado". El término supervisado se refiere al hecho de que el operador atencional está entrenado para detectar ejemplos de una clase particular. En el dominio de la detección de rostros, es posible obtener menos de 1% de falsos negativos y 40% de falsos positivos utilizando un clasificador construido a partir de dos características tipo Harr [7]. El paquete de soporte de MATLAB para la Raspberry Pi permite escribir programas de MATLAB que se comuniquen con la Raspberry Pi y adquieran datos de los pines GPIO de la placa, cámaras y otros dispositivos conectados. Dado que MATLAB es un lenguaje interpretado de alto nivel, resulta fácil prototipar y ajustar los algoritmos para los proyectos de la Raspberry Pi. MATLAB incluye miles de funciones matemáticas y de

ISBN: 978-607-9394-14-1.



representación gráfica integradas que se pueden utilizar para la programación en la Raspberry Pi y que abarcan dominios tales como procesado de imágenes y vídeo, optimización, estadísticas y procesado de señales [4].

2. Materiales y métodos

La visión artificial, en un intento de reproducir este comportamiento, define tradicionalmente cuatro fases principales:

- La primera fase, que es puramente sensorial, consiste en la *captura o adquisición* de las imágenes digitales mediante algún tipo de sensor.
- La segunda etapa consiste en el tratamiento digital de las imágenes, con objeto de facilitar las etapas posteriores. En esta etapa de *procesamiento previo* es donde, mediante filtros y transformaciones geométricas, se eliminan partes indeseables de la imagen o se realzan partes interesantes de la misma.
- La siguiente fase se conoce como *segmentación*, y consiste en aislar los elementos que interesan de una escena para comprenderla.
- Por último se llega a la etapa de *reconocimiento o clasificación*. En ella se pretende distinguir los objetos segmentados, gracias al análisis de ciertas características que se establecen previamente para diferenciarlos [1].

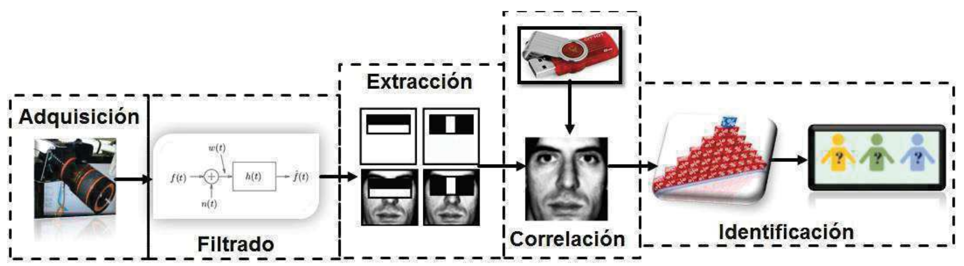


Figura 1. Metodologia propuesta de identificación facial.

2.1 Adquisición

La primera etapa está formada por el módulo de cámara Rasperry pi V1, cuyas características podemos ver en la tabla 1 de este documento, aunque la versatilidad del algoritmo y el software de implementación, permite la utilización de cualquier tipo de cámara a diferentes resoluciones, la cámara raspberry pi destaca debido a facilidad de conexión ya que pertenece a la misma compañía que la tarjeta de adquisición utilizada, por lo cual no requiere controladores específicos para la compatibilidad con la raspberry pi.

2.1.1 Módulo Cámara Raspberry pi

El módulo de cámara Raspberry Pi es un producto oficial de la Fundación Raspberry Pi. El modelo original de 5 megapíxeles fue lanzado en 2013, y un Camera Module v2 de 8 megapíxeles fue lanzado en 2016. Para ambas iteraciones, hay versiones de luz visible e infrarroja [6]. En la figura 2 se muestra una imagen el módulo de cámara fotográfica utilizada para la adquisición de las muestras para las pruebas del algoritmo implementado.

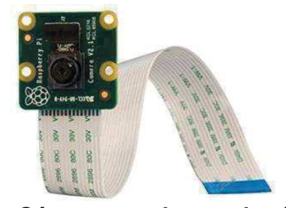


Figura 2. Cámara raspberry pi módulo v1.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 70-79.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Características del módulo uno de cámara raspberry pi.

Característica	Camera Module v1
Dimensiones	25 × 24 × 9 mm
Peso	3g
Resolución	5 Megapixeles
Modos de video	1080p30, 720p60 and 640 × 480p60/90
Sensor	OmniVision OV5647
Resolución del sensor	2592 × 1944 pixeles
Área de imagen del sensor	3.76 × 2.74 mm
Dimensión del pixel	1.4 µm × 1.4 µm
Dimensión óptica	1/4"
Relación Señal/Ruido	36 dB
Rango dinámico	67 dB @ 8x gain
Sensibilidad	680 mV/lux-sec
Oscuridad	16 mV/sec @ 60 C
Enfoque	1 m to infinity
Distancia focal	3.60 mm +/- 0.01
Campo de visión horizontal	53.50 +/- 0.13 grados
Campo de visión vertical	41.41 +/- 0.11 grados

2.1.2 Raspberry pi 3B

Debido a que la cámara no puede conectarse directamente con el software de implementación de Matlab se recurre a la tarjeta de desarrollo raspberry pi 3b, la cual en la actualidad se ha convertido en una de las tarjetas de aplicación más utilizadas debido a sus características y compatibilidad actual con diversos software de ingeniería, en la figura 3 se muestra la tarjeta utilizada en el proyecto del presente artículo.



Figura 3. Raspberry pi Modelo 3B.

Dentro de las características obresalientes del modelo de Raspberry, el Pi 3B destacan, su circuito un chipset *Broadcom BCM2387* con cuatro núcleos *ARM Cortex-A53* a 1.2 GHz, el cual permite adquirir la información de la cámara lo más rápido posible para una rasperry pi, además de disponer de una gran potencia de procesado para otro tipos de tareas. La GPU encargada de los gráficos es la Broadcom VideoCore IV, una solución Dual Core compatible con Open GL ES 2.0 y OpenVG que permite llegar a resoluciones Full HD con soltura [6].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2 Filtrado

Debido a que las pruebas se realizan al exterior bajo condiciones no controladas las muestras tomadas se someten a un nivel bajo de ruido, por lo tanto es necesario agregar un filtro para imágenes, dicho filtro seleccionado es el filtro Wiener ya que la función de Matlab no requiere parámetros específicos a excepción del tamaño de la ventana de filtrado.

El filtro Wiener, o MMSE (Minimum Mean Square Error) desarrollado por Norbert Wiener, considera información estadística del ruido y la incorpora al modelo de manera que tiene mejor efecto de restauración [5].

Basando en la condición de minimización de error cuadrático medio, Wiener propone la siguiente ecuación [1].

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{S_{II}(\omega_1,\omega_2)H^*(\omega_1,\omega_2)}{|H(\omega_1,\omega_2)|^2 S_{II}(\omega_1,\omega_2)+S_{\eta\eta}(\omega_1,\omega_2)} \tag{1}$$

2.2.1 Función de filtrado de matlab

El filtro Wiener de Matlab estima la media local y la varianza alrededor de cada píxel.

$$\mu = \frac{1}{NM}\sum_{n_1,n_2\in n} a(n_1, n_2) \tag{2}$$

Y

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM}\sum_{n_1,n_2\in n} a^2(n_1, n_2) - \mu^2 \tag{3}$$

Donde η es el vecindario local N-por-M de cada píxel en la imagen A. Luego crea un filtro Wiener en píxeles usando estas estimaciones.

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2}(a(n_1, n_2) - \eta) \tag{4}$$

Donde v^2 es la varianza del ruido. Wiener usa el promedio de todas las varianzas locales estimadas [4].

2.3 Segmentación Viola-Jones

El algoritmo de Viola-Jones utiliza un producto escalar entre la imagen y algunas plantillas. Para compensar el efecto de las diferentes condiciones de iluminación, todas las imágenes deben ser medias y la varianza normalizada de antemano. Las imágenes con una varianza inferior a uno, que tienen poca información de interés en primer lugar, se dejan de lado [8].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 7, pp. 70-79.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



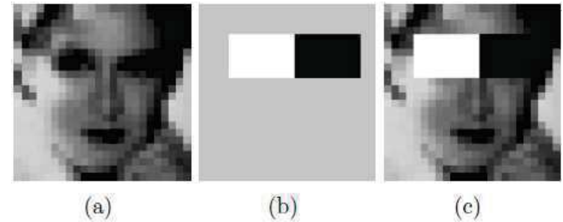


Figura 4. Segmentación Viola-Jones. Solo los píxeles marcados en blanco o negro se usan cuando se calcula la función correspondiente.

2.4 Identificación por coeficientes de correlación normalizada

La correlación es en forma general la medida de similitud entre señales. La correlación en dos dimensiones en su forma discreta de funciones reales se define como.

$$f(x,y) \cdot g(x,y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n}^{N-1} f(m,n) g(x+m, y+n) \tag{5}$$

La correlación en dos dimensiones tiene las mismas propiedades que la correlación en una dimensión. En la figura se muestra un ejemplo de la aplicación de la autocorrelacion. La aplicación en usar la función de correlación para localizar un objeto en una imagen [5].

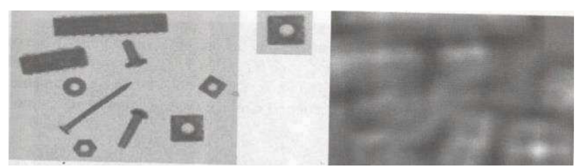


Figura 5. Ejemplo de correlación entre imágenes.

3. Resultados

3.1. Algoritmo de implementación

En la figura 6 se muestra un modelo básico del sistema de identificación que se implementara, en el modelo podemos observar las secciones de las cuatro etapas de un sistema de identificación de personas.

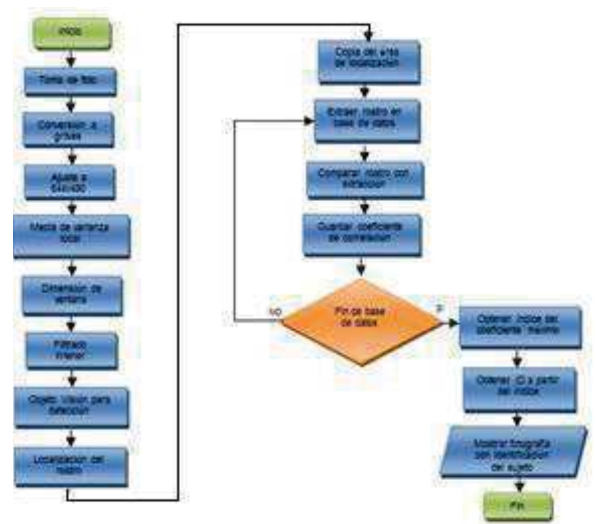


Figura 6 Etapas de implementación del algoritmo de identificación.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.2 Base de datos

La base de datos está formada por los rostros en escala de grises, de un grupo de diez personas, a las cuales se les realizaran una serie de fotografías al aire libre con ambiente no controlado, el motivo del grupo de personas es debido a la falta de recursos tecnológicos proporcionados por la institución donde se realizan las pruebas además de la disponibilidad de los sujetos de pruebas, además de que las bases de datos más utilizadas como la AR, FERET y LFW no contienen una muestra con un amplio escenario.

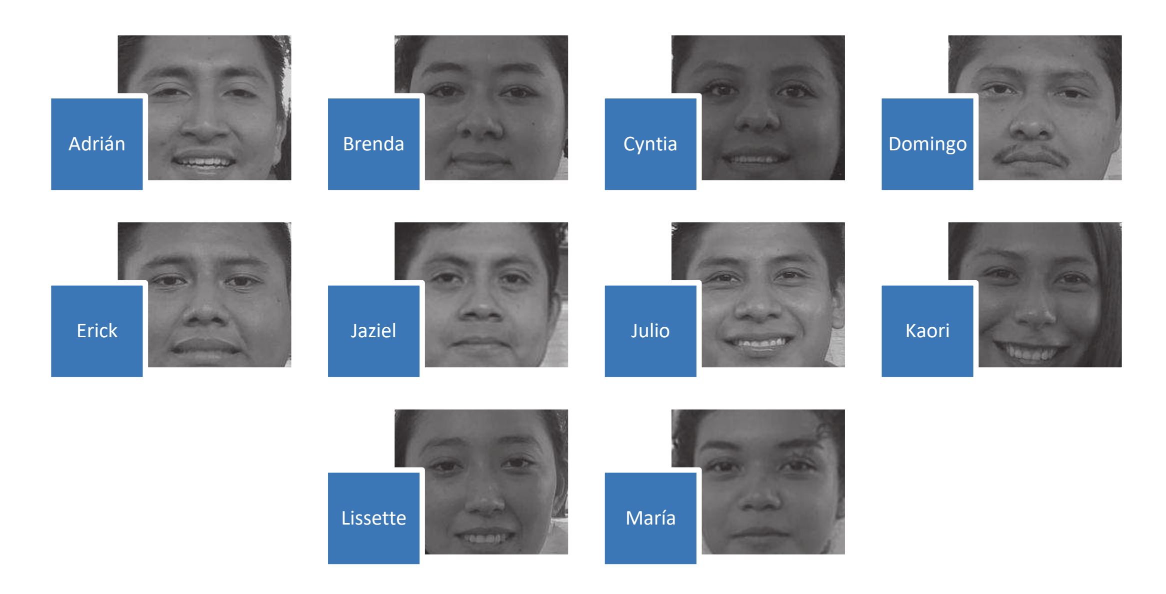


Figura 7. Base de Datos, imágenes de 200x200 pixeles.

3.3 Identificación con ruido gaussiano

Las primeras pruebas se realizan con ruido gaussiano con varianza de 0.001, en la figura 7 se observa el primer resultado donde se indica en coeficiente máximo de correlación junto con la identificación del sujeto desconocido.

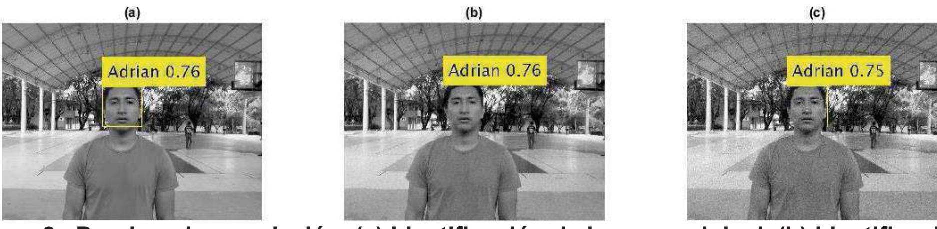


Figura 8. Pruebas de correlación, (a) Identificación de imagen original, (b) Identificación filtrada, (c) Identificación con ruido.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



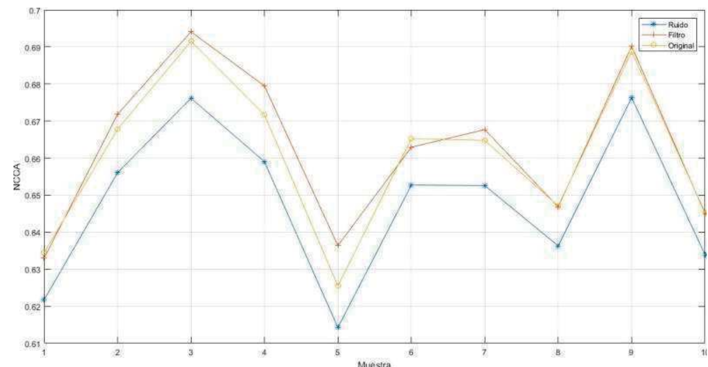


Figura 9. Resultados de correlación con 10 muestras del sujeto 1.

En la figura 9 se muestra los índices máximos de correlación resultados de diez muestras del sujeto uno con la imagen de su rostro en base de datos, el análisis se realiza con la imagen original, con ruido gaussiano e imagen filtrada.

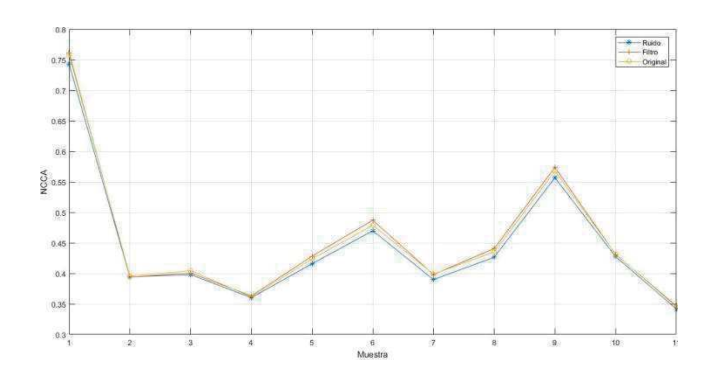


Figura 10. Resultados de correlación de una muestra con los sujetos de la base de datos.

En la figura 10 se observan los índices máximos de correlación de la comparación de una muestra con las once imágenes de la base de datos, el primer resultado es debido a que la imagen de análisis pertenece al sujeto de la primera imagen de la base de datos y los resultados posteriores son las correlaciones con las imágenes de los sujetos restantes de la base de datos.

En la figura 11 se muestran los resultados de correlación del algoritmo de identificación a un conjunto de 10 fotografías, cada fotografía pertenece a un sujeto dentro de la base de datos.

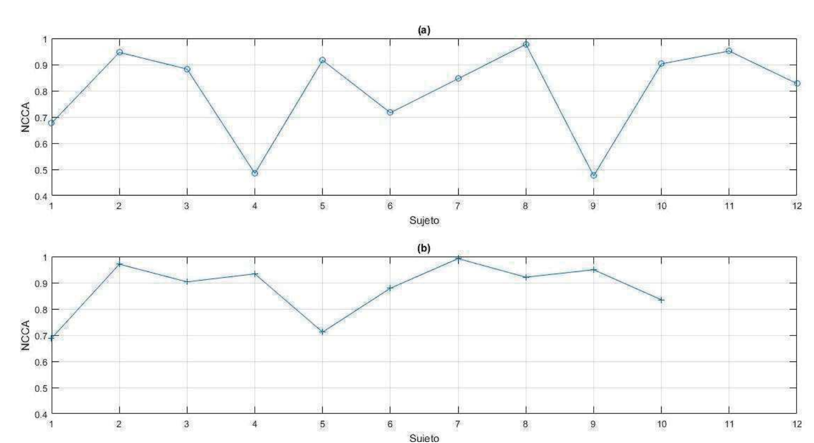


Figura 11. Indice de identificación de sujetos, (a) Identificación de imagen original, (b) Identificación de imagen filtrada.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 2. Tabla de resultados de identificación de algoritmo sin filtro wiener.

Muestra	Rostros extraídos	NCC	Identificación
1	1	0.67639	Adrian
2	1	0.94644	Brenda
3	1	0.88269	Cyntia
4	2	0.48475, 0.91636	Brenda, Domingo
5	1	0.71622	Erick
6	1	0.84601	Jaziel
7	1	0.97726	Julio
8	2	0.47568, 0.90274	Jaziel, Kaori
9	1	0.95168	Lissete
10	1	0.82746	Maria

Tabla 3. Tabla de resultados de identificación de algoritmo con filtro wiener.

Muestra	Rostros extraídos	NCC	Identificación
1	1	0.6882	Adrian
2	1	0.97066	Brenda
3	1	0.90328	Cyntia
4	1	0.93385	Domingo
5	1	0.71162	Erick
6	1	0.87907	Jaziel
7	1	0.99203	Julio
8	1	0.92108	Kaori
9	1	0.94959	Lissete
10	1	0.83488	Maria

En la tabla 2 se observa que el algoritmo de extracción de rostro de Viola-Jones proporciona falsos positivos en el sujeto 4 y 8, lo que provoca una identificación extra pero es notorio que la correlación está por debajo del 0.5 de similitud, lo cual se puede definir como el límite superior para falsos positivos.

El algoritmo de Viola-Jones funciona exitosamente para extracción de rostros aun que debido a los niveles de ruido en la imágenes, el método llega a confundir espacios mismos del escenario carente de sujetos y los toma como un rostro.

En la tabla 3 observamos que al aplicarle el filtro Wiener los falsos positivos iniciales se corrigen ya que las características de los rostros aumentan su definición al disminuir el ruido en la imagen, el filtro tiene como característica principal una matriz de 2x2 que permite un menos número de iteraciones.

Posteriormente se realizan pruebas con diversos gestos como se menciona en el capítulo 2 de este artículo.

La finalidad de esta prueba es someter a expresiones que podrían ser comunes del sujeto a evaluar ya que el siguiente paso para este proyecto es la implementación en un vehiculo aéreo no tripulado por lo tanto es necesario la realización en exteriores e incluso suponer la intención del sujeto de confundir al algoritmo al modificar su rostro con gestos mal intencionados.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 12. Ejemplos de imágenes con gestos improvisados.

El total se las muestras utilizadas es de 172 fotografías a cada una se le aplico el algoritmo mostrado en la figura 6, y proporciono como resultados la siguiente gráfica.

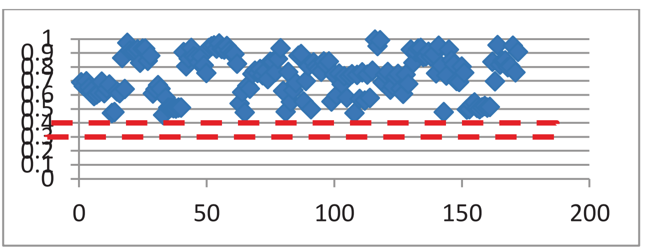


Figura 13. Grafica de dispersión del cálculo NCC de las imágenes tomadas.

La zona en color rojo de la figura 13 se muestran los coeficientes de correlación normalizados que no lograron obtener el 50% de correlación y cuya identificación no coincide con el rostro de la persona en la imagen. Al analizar detalladamente se obtiene la tabla de contingencia como se muestra en la tabla 4, donde se observa que 128 identificaciones fueron exitosas.Para la determinación de la efectividad del algoritmo los resultados fueron sometidos al análisis de curvas ROC (Característica Operativa del Receptor), la cual se muestra a continuación.

Tabla 4. Tabla de contingencia.

	p	N
p	128	35
n	6	3

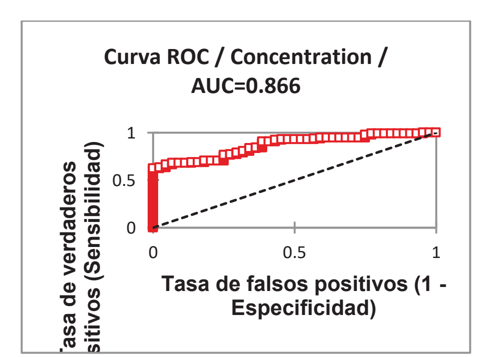


Figura 14. Grafica de curva ROC del algoritmo de identificación facial.

En la figura 15 se muestran las curvas ROC de diversos métodos analizados por Yuanyuan Ding, donde se observa como el efecto del ruido afecta la efectividad de los métodos de identificación,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



pero en comparación con el método propuesto en este artículo su efectividad se encuentra a par de los resultados con bajo ruido σ = 0.05, con la ventaja de utilizar dentro del conjunto de imágenes los gestos y escenarios cambiantes en forma aleatoria.

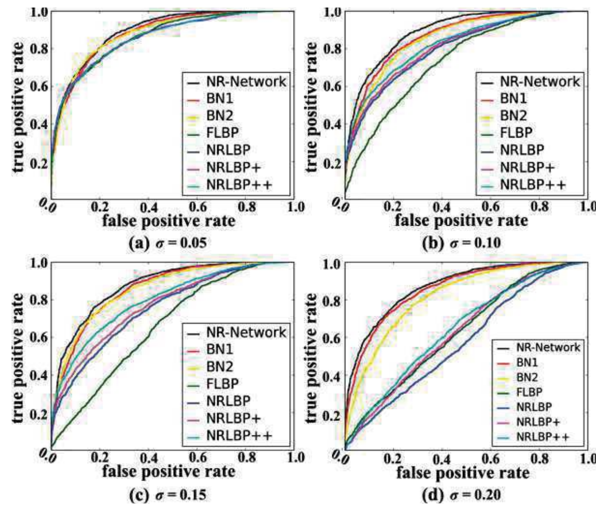


Figura 15. Grafica de curva ROC de diversos métodos de identificación.

4. Conclusiones

En conclusión la conectividad entre raspberry pi y Matlab permiten la implementación de este algoritmo el cual muestra que la interacción del filtro Wiener permite la mejoría de las propiedades de reconocimiento del algoritmo viola-jones ya que evita la extracción de falsos positivos de rostros ubicados en la imagen, y en el caso de la comparación la función de coeficientes de correlación normalizada sirve como comparador eficaz gracias a la habilidad del algoritmo viola-jones de extracción del rostro. Las portaciones de este trabajo son el algoritmo de identificación de personas junto con la implementación en la tarjeta de desarrollo raspberry pi usando Matlab como medio de comunicación y programación, ambos aportes permitirán a la institución donde se realizó el proyecto actualizarse en el área de procesamiento de imágenes. Así mismo se integra un nuevo enfoque de estudios en escenarios externos con cambios aleatorios, lo cual nos lleva a la investigación a futuro de ampliar la distancia de detección, la cual por el momento es de 2 metros

Referencias

1. Gonzalez, R. C. (2001). *Digital Image Processing.* New Jersey, USA: Prentice Hall.
2. Holder, R. P., & Tapamo, J. R. (2017). Improved gradient local ternary patterns for facial expression recognition. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*(42), 15.
3. Kubanek, M., & Bobulski, J. (2017). The use of hidden Markov models to verify the identity based on facial asymmetry. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*(45), 14.
4. MathWorks. (1 de 2 de 2018). *LA MathWorks*. Obtenido de https://la.mathworks.com/discovery/raspberry-pi-programacion-matlab-simulink.html
5. Murguía, M. I. (2007). *Procesamiento Digital de Imagenes.* México: Trillas.
6. Upton, E. (25 de Marzo de 2013). *Raspberry Pi*. Obtenido de Raspberry Pi: https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/README.md
7. Viola, P., & Jones, M. (2004). Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 13.
8. Wang, Y.-Q. (2014). An Analysis of the Viola-Jones Face Detection Algorithm. *Image Processing On Line*(4), 128-148.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 8, pp. 80-91.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño y Manufactura de Recipientes para Almacenamiento de Líquidos

González Vázquez Luis Gabriel, Gudiño Venegas René y Cervantes González Luis Cesar [1]

Instituto Tecnológico Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Tamazula, Instituto Tecnológico De Ciudad Guzmán[1]

Resumen.

Los recipientes que en la actualidad son parte fundamental de la vida cotidiana, tienen una amplia utilización en todo tipo de industrias, sobre todo la alimentaria. Además de que su utilización se espera vaya en aumento con envases más ligeros y sustentables. El presente trabajo muestra el procedimiento seguido para obtener ecuaciones en cuerpos geométricamente regulares como lo es, el prisma rectangular y el cilindro, ambos abiertos de la parte superior. Se desarrolla una aplicación con ecuaciones obtenidas en Visual Studio. Y para su utilización se necesita conocer por el usuario la densidad relativa y la cantidad del líquido a almacenar, para que esta aplicación le proporcione al usuario las dimensiones mínimas requeridas.

En el caso de los cuerpos geométricamente irregulares se enfocó el análisis en el diseño de un molde de botella utilizando SolidWorks para el diseño CAD, para la programación y simulación Surfcam 2014R2 y para maquinarlo se utilizó una solera de aluminio 1060 en un centro de maquinado Chevalier con control Fanuc y herramientas de corte Alu-Power.

Palabras clave: Recipiente, CAD, CAM, Molde, VisualEstudio, SolidWorks, SurfCam

1. Introducción.

La aplicación de las matemáticas en la solución de problemas de la vida diaria es una herramienta útil, que permiten emplear los recursos materiales de forma óptima y cuando su uso se combina con la informática, permite automatizar cálculos monótonos y repetitivos con la certeza de que no hay forma de tener resultados erróneos. Esta demostración ayuda a que los estudiantes de ingeniería validen los resultados que se obtienen al construir los recipientes con los resultados que se obtienen en el cuaderno el uso de las matemáticas y la mecánica de fluidos.

En la actualidad es posible manufacturar moldes para soplar preformas de botellas pet, haciendo uso de las máquinas de control numérico computarizado. Este es un tema conocido más no difundido por los especialistas, aspecto que ha motivado y ha sido la razón principal para incursionar en el diseño, programación y manufactura de moldes. Por otra parte es importante mencionar que los componentes del molde deben tener las mismas dimensiones geométricas, y en el dibujo asistido por computadora de la botella el radio mínimo que se dibuje deberá ser mayor a la herramienta de corte más pequeña que se utilizará, cuidando que la longitud del cortador no sea mayor a la profundidad que se debe de maquinar, ya que de lo contrario podría colisionar el husillo del centro de maquinado con la solera de aluminio.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 8, pp. 80-91.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Recipientes.

El análisis y diseño de recipientes en su geometría permite que se utilice la menor cantidad de material posible para su construcción. En el primer apartado se realiza la deducción de ecuaciones para encontrar las dimensiones mínimas del prisma cuadrangular y del cilindro, las cuales fueron programadas en Visual Studio. En el segundo apartado se ilustra el procedimiento para construir un recipiente con geometría irregular de acuerdo a la cantidad y tipo de líquido a almacenar utilizando SolidWorks, Surfcam y un centro de maquinado vertical.

2.1 Análisis del diseño de recipientes geométricamente regulares "prisma cuadrangular y cilíndrico".

Para deducir las ecuaciones de los cuerpos geométricamente regulares, se tomaron en cuenta variables que son fáciles de medir como lo es la densidad, el área, el volumen y la aplicación de la derivada para determinar las dimensiones mínimas en ambos recipientes. Es importante hacer énfasis que se busca almacenar líquidos, por esta razón abordaremos algunas variables básicas de la mecánica de fluidos.

Un fluido es una sustancia que puede existir en tres estados de agregación: sólido, líquido y gas (a temperaturas muy elevadas también existe como plasma). La **densidad** se define como *masa por unidad de volumen* [1]. Es decir:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

Donde ρ representa a la densidad, m representa la masa y V representa el volumen. La densidad relativa o gravedad específica puede ser medida utilizando un densímetro y se relaciona mediante la ecuación:

$$\rho_r = G.E. = \frac{\rho}{\rho_{H2O}} \tag{2}$$

ρ_r Representa la densidad relativa, $G.E.$ es gravedad específica y ambas se usan como sinónimo. Considere que la densidad del agua es $\rho_{H2O} = 1000\frac{kg}{m^3}$ a una temperatura de 4°C.

El área y el volumen de los cuerpos geométricos a analizar son los siguientes [2]:

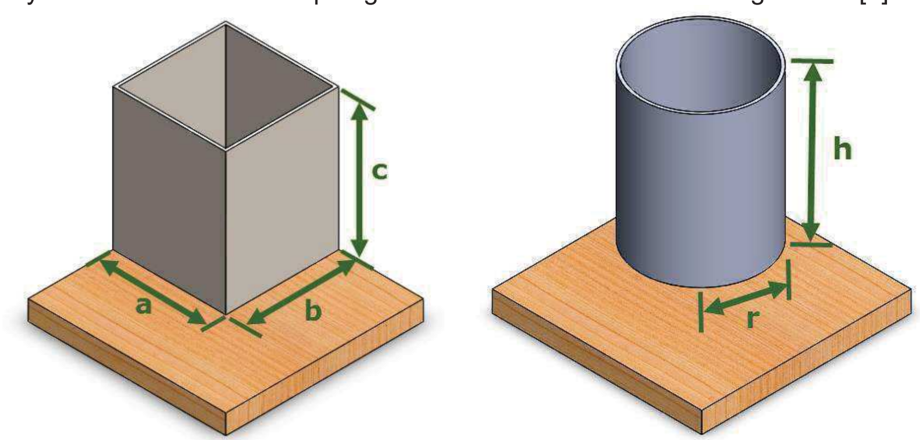


Figura 1. Recipientes abiertos de la parte superior: a) Prisma cuadrangular, b) Cilindro

En el caso del prisma cuadrangular $a, b\ y\ c$ representan las aristas y V el volumen:

$$A_{transversal} = ab = a^2 \tag{3}$$
$$A_{lateral} = 2ac + 2bc = 4ac \tag{4}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$V = abc = a^2c \tag{5}$$

En el cilindro el radio se representa con la r, el diámetro con la d, la altura con h y π es una constante igual a 3.1416

$$A_{transversal} = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \tag{6}$$

$$A_{lateral} = 2\pi rh$$

$$V = \pi r^2 h = \frac{\pi d^2 h}{4} \tag{8}$$

2.1.1 Dimensiones mínimas para el prisma cuadrangular ($a = b$).

Considerando que los datos que se introducirán a la ecuación son la cantidad y densidad del líquido a almacenar. De la ecuación 2 se despeja la densidad ρ

$$\rho = \rho_{rel}\rho_{H2O} \tag{9}$$

Se sustituye la ecuación 9 en la ecuación 1

$$\rho_{rel}\rho_{H2O} = \frac{m}{V} \tag{10}$$

Al sustituir la densidad del agua es $1000\,\frac{kg}{m^3}$ y despejar a V de la ecuación 10

$$V = \frac{m}{1000\rho_{rel}} = \frac{0.001m}{\rho_{rel}} \tag{11}$$

El recipiente es abierto de la parte superior, al sumar el área transversal y lateral se obtiene

$$A = A_{transversal} + A_{lateral} = a^2 + 4ac \tag{12}$$

Al sustituir la ecuación 11 en la ecuación 5 se obtiene

$$a^2c = \frac{0.001m}{\rho_{rel}} \tag{13}$$

Al despejar la variable c se obtiene

$$c = \frac{0.001m}{a^2c\rho_{rel}} \tag{14}$$

Al sustituir la ecuación 14 en la 12 y simplificarla resulta

$$A = a^2 + (4\cancel{a})\left(\frac{0.001m}{\cancel{a^2}\rho_{rel}}\right) = a^2 + \frac{0.004m}{a\rho_r} \tag{15}$$

Igualando a cero la ecuación 15

$$0 = a^2 + \frac{0.004m}{a\rho_r} \tag{16}$$

Derivando resulta la siguiente expresión

$$\frac{dA}{da}\left(a^2 + \frac{0.004m}{a\rho_r}\right) = 2a - \frac{0.004m}{a^2\rho_r} \tag{17}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Al despejar de la ecuación 17 la variable a resulta:

$$a = \sqrt[3]{\frac{0.004m}{2\rho_{rel}}} \tag{18}$$

La base del recipiente es cuadrada

$$a = b \tag{19}$$

La altura la determinamos con la ecuación 14

$$c = \frac{0.001m}{a^2 c \rho_{rel}} \tag{14}$$

El área total la determinamos con la ecuación 12

$$A = \ a^2 + 4ac \tag{12}$$

2.1.2 Dimensiones mínimas para determinar el recipiente cilíndrico.

Para deducir las ecuaciones del cilindro se considera que se contará con la cantidad y densidad del líquido a almacenar. Para resolver este caso se toman en cuenta las ecuaciones 9,10 y 11. Esta última se sustituye en la ecuación 8

$$\frac{0.001m}{\rho_{rel}} = \pi r^2 h \tag{20}$$

Al despejar la variable h se obtiene

$$h = \frac{0.001m}{\pi r^2 \rho_{rel}} \tag{21}$$

El área total resulta al sumar las áreas transversal y lateral

$$A = A_{transversal} + A_{lateral} = \ \pi r^2 + 2\pi r h \tag{22}$$

Se sustituye la ecuación 21 en la 22 para que de esta forma haya solo una variable

$$A = \ \pi r^2 + (2\cancel{\pi r})\left(\frac{0.001m}{\cancel{\pi r^2}\rho_{rel}}\right) = \pi r^2 + \left(\frac{0.002m}{r\rho_{rel}}\right) \tag{22}$$

Al derivar esta expresión obtenemos

$$\frac{dA}{dr}\left(\pi r^2 + \frac{0.002m}{r\rho_{rel}}\right) = 2\pi r - \frac{0.002m}{r^2\rho_{rel}} \tag{23}$$

Al igual esta expresión a 0, obtenemos

$$0 = 2\pi r - \frac{0.002m}{r^2\rho_{rel}} \tag{24}$$

Al despejar la variable r, resulta

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$r = \sqrt[3]{\frac{0.001m}{\pi \rho_r}} \tag{25}$$

Para determinar la altura h del cilindro, se utiliza la ecuación 21

$$h = \frac{0.001m}{\pi r^2 \rho_{rel}} \tag{21}$$

Para conocer el área total se utiliza la ecuación 22

$$A = \pi r^2 + 2\pi rh \tag{22}$$

2.2 Diseño de recipiente irregular "Botella".

Para el diseño de la botella se tomó en cuenta el siguiente diagrama de flujo



Figura 2. Diagrama de flujo de diseño y mecanizado.

2.2.1 Etapa I. Modelado de la botella en SolidWorks.

SolidWorks es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno grafico basado en Microsoft Windows, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas [3].

El modelado de la botella se dibujó en el plano frontal, con la intención que coincida, con las coordenadas de Surfcam. Para que este archivo se pueda abrir en Surfcam se guardó con la extensión .step204

ISBN: 978-607-9394-14-1.



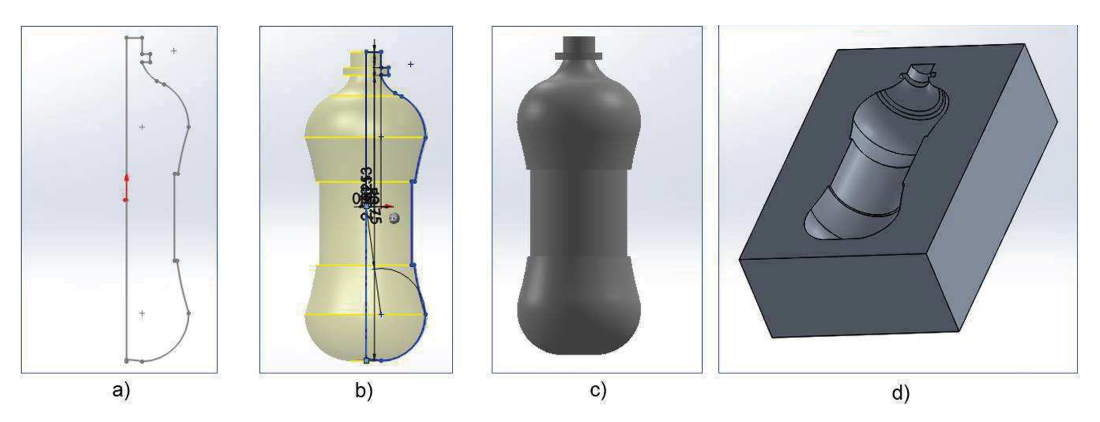


Figura 3. Modelo realizado en SolidWorks: a) Croquis, b) Revolución, c) Solido y d) Molde de botella. El modelo solido que corresponde al c), permite estimar el volumen del recipiente. Una vez que se especificó la densidad del líquido que se almacenara.

2.2.2 Etapa II. Programación y simulación del maquinado con Surfcam 2014R2

SurfCAM es un software de Control Numérico que opera con Windows. Incluye funcionalidades de diseño mecánico para programar centros de maquinado de dos a cinco ejes, torno y electroerosión de corte por hilo. Surfcam permite realizar los diseños CAD o en su defecto importarlos [4]. A continuación se muestran imágenes de la simulación del maquinado

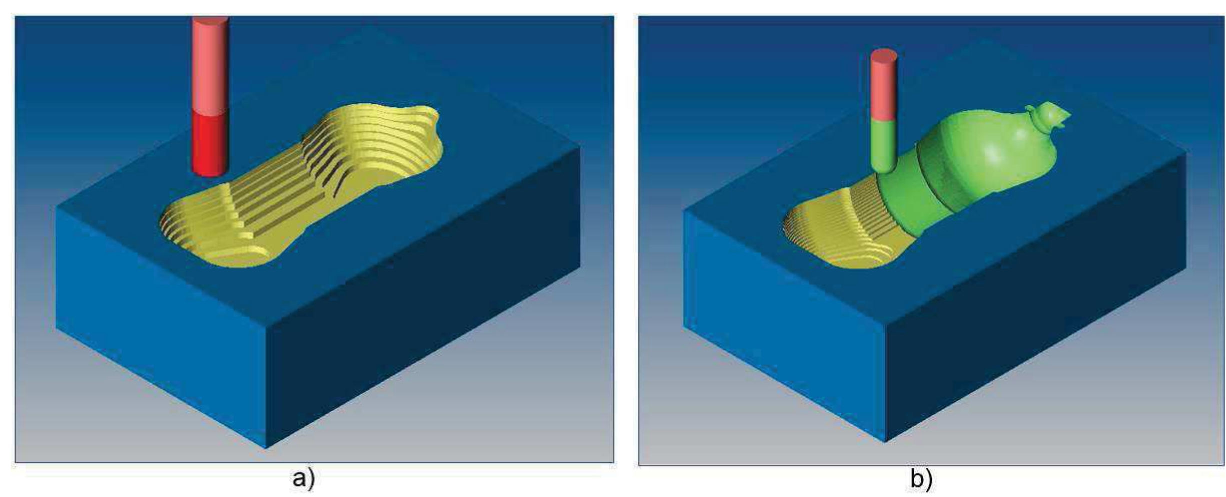


Figura 4. Programación y simulación realizada en Surfcam: a) operación desbaste con cortador end mill, b) operación planar con cortador ball mill.

Los parámetros que se utilizaron fueron los siguientes:

Tabla 1. Parámetros de corte en los cortadores End mill.

Cortador End mill (Plano)						
Operación	Numero de flautas	Diámetro In	RPM	Avance (in/min)	Vel. Penetración	Corte por pasada (in)
Desbaste cara superior del material.	4	0.5	8500	40	10	0.040
Desbaste de la botella.	4	0.5	8500	40	10	0.040

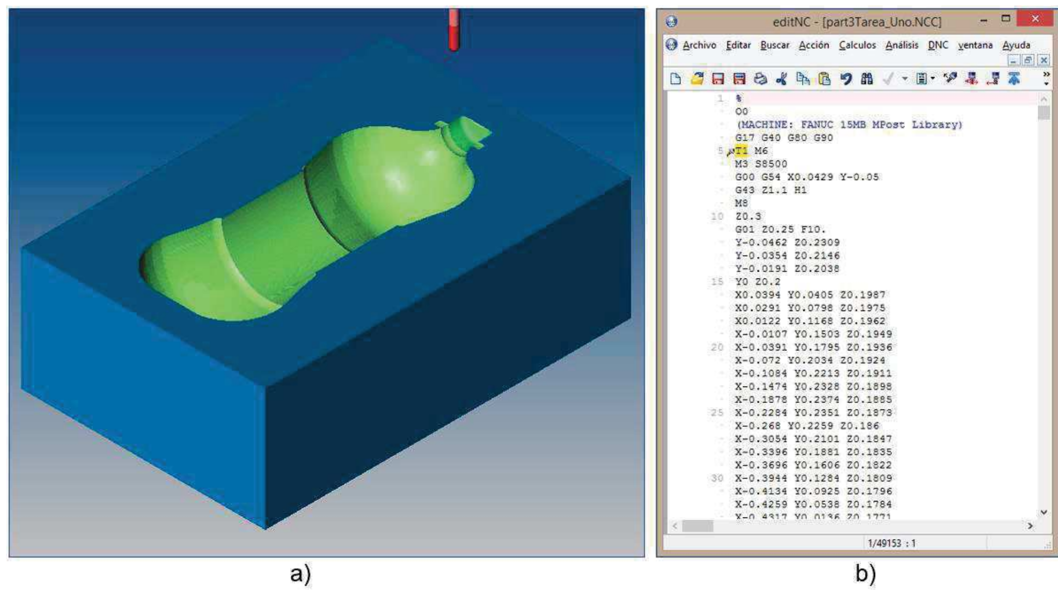
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 2. Parámetros de corte en los cortadores Ball mill.

Cortador Ball mill (Bola)						
Operación	Numero de flautas	Diámetro In	RPM	Avance (in/min)	Vel. Penetración	Incremento (in)
Planar cuerpo de la botella	4	0.375	8500	40	10	0.010
Planar cuello de a botella	2	0.125	8500	10	10	0.010

Una vez que la simulación cumplió con las expectativas, se generó el código para el control que tiene el centro de maquinado el cual es Fanuc



a) b)

Figura 5. a) Simulación de Surfcam maquinado del cuello de la botella, b) Códigos G y M generados para el control Fanuc por Surfcam.

2.2.3 Etapa III. Mecanizado del molde en el centro de maquinado Chevalier.

La evolución del control numérico ha permitido su utilización tanto en pequeñas como medianas y grandes empresas, lo que ha generado la necesidad de trabajadores especializados con grandes conocimientos de la técnica de CNC [5]. El centro de maquinado vertical tiene capacidad para almacenar 12 herramientas de corte y capacidad para trabajar en 3 ejes, en un espacio de trabajo en los ejes X y Y de 13.75 in X 17.75 pulgadas respectivamente.



Figura 6. Centro de maquinado vertical.

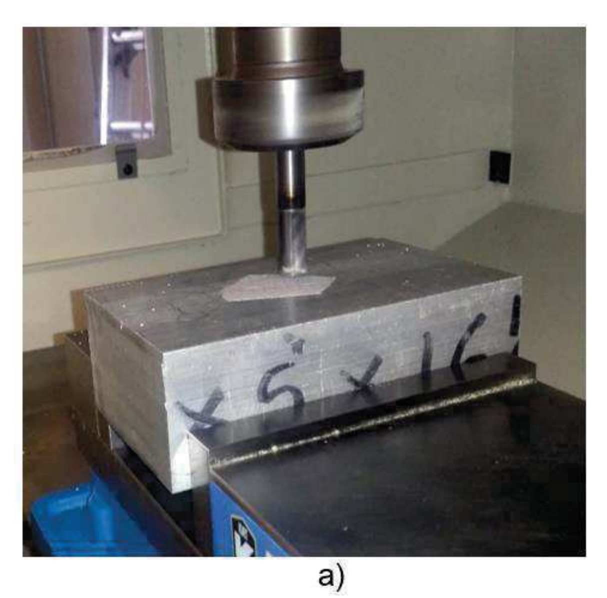
Para mecanizar el molde se realizan los siguientes preparativos:

ISBN: 978-607-9394-14-1.

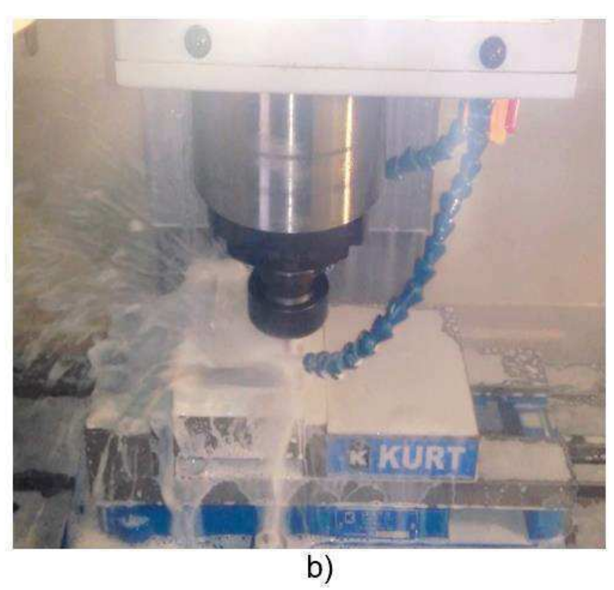


1. Ensamblar las herramientas de corte en los conos CAD ER 40
2. Revisar la presión neumática y el nivel de soluble en el centro de maquinado.
3. Sujetar la solera de aluminio en la prensa.
4. Obtener el cero pieza y la altura de la herramienta que se utilizar.
5. Ejecutar el programa y supervisar que funcione correctamente.

Para obtener la altura de las distintas la herramientas de corte se colocó un pedazo de papel en la parte superior de la solera de aluminio, posteriormente se pone a girar en sentido horario el husillo del centro de maquinado. Cuando el cortador roza el papel este empieza a girar, esto representa que la separación entre el papel y el cortador es igual o menor al espesor del papel. Finalmente se acomodaron las mangueras para que el flujo de soluble colisionara en el cortador y ayudara a disipar el calor que se genera al momento que la herramienta va cortando.



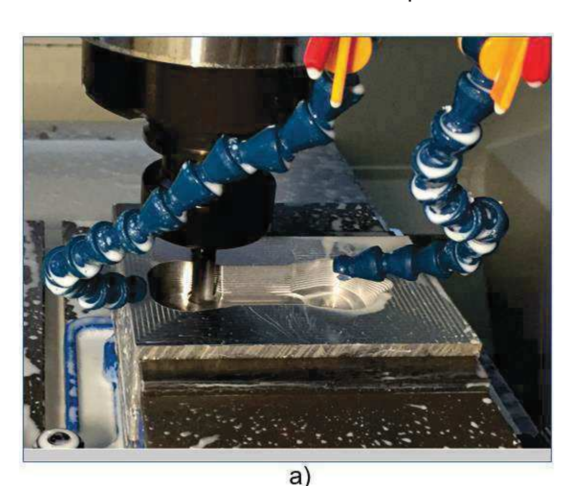
a)



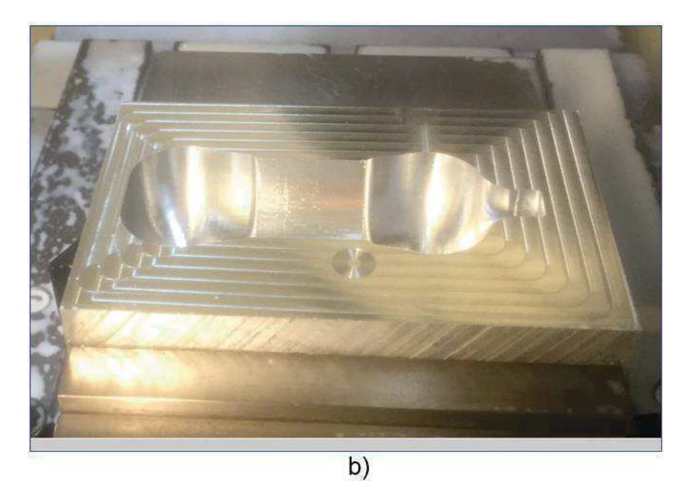
b)

Figura 7. Preparativos del centro de maquinado: a) Setear la herramienta de corte y b) El flujo de soluble colisionando con el cortador.

Para disminuir el desgaste en las herramientas de corte primero se utiliza un cortador endmill y al final dos cortadores de balmill para obtener un mejor acabado.



a)



b)

Figura 8. Maquinado: a) Desbaste con el cortador de 0.5 in y b) Acabado de 0.375 y 0.125 in de diámetro.

2.2.3 Etapa IV. Validación.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



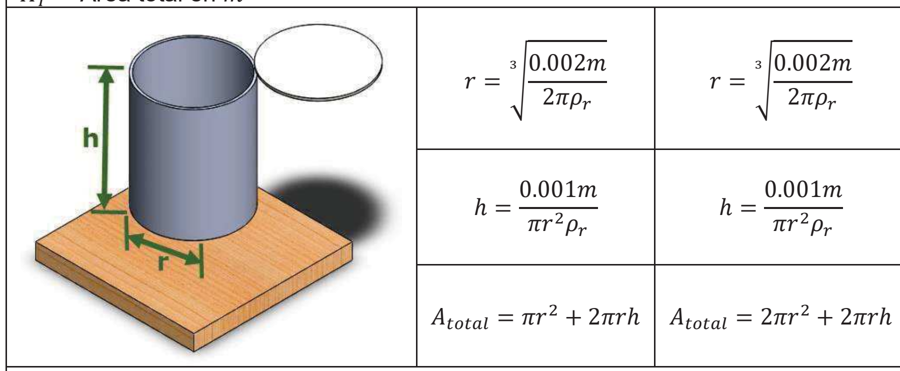
Para validar el diseño hacemos uso de la metrología, la cual la describen como: la ciencia de la medición, comprendiendo las determinaciones experimentales y teóricas a cualquier nivel de incertidumbre en cualquier campo de la ciencia y la tecnología [6]. En esta etapa se propone comparar las dimensiones del diseño que se realizó en la computadora con las del maquinado.

3. Resultados.

3.1 Recipientes regulares.

Las ecuaciones que se obtuvieron fueron solamente para recipientes abiertos, también se proporcionan con la parte superior tapada.

Tabla 3. Ecuaciones obtenidas.

Ilustración	Abierto	Cerrado
	$a = \sqrt[3]{\frac{0.004m}{2\rho_r}}$	$a = \sqrt[3]{\frac{0.004m}{2\rho_r}}$
	$a = b$	$a = b$
	$c = \frac{0.001m}{a^2\rho_r}$	$c = \frac{0.001m}{a^2\rho_r}$
	$A_{total} = a^2 + 4ac$	$A_{total} = 2a^2 + 4ac$
Donde: a = representa la dimensión de una arista de la base y se indica en metros m b = representa la dimensión de una arista de la base y se indica en metros m c = representa la dimensión de una arista de la altura y se indica en metros m m = Representa la masa que se desea almacenar y se indica en kg ρ_r = Densidad relativa y no tiene unidad de medida A_T = Área total en m^2		
	$r = \sqrt[3]{\frac{0.002m}{2\pi\rho_r}}$	$r = \sqrt[3]{\frac{0.002m}{2\pi\rho_r}}$
	$h = \frac{0.001m}{\pi r^2\rho_r}$	$h = \frac{0.001m}{\pi r^2\rho_r}$
	$A_{total} = \pi r^2 + 2\pi rh$	$A_{total} = 2\pi r^2 + 2\pi rh$
Donde: r = Representa el radio del cilindro en metros m h = Representa la altura del cilindro en metros m m = Representa la masa que se desea almacenar y se indica en kg ρ_r = Densidad relativa y no tiene unidad de medida A_T = Área total en m^2		

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Estas ecuaciones fueron programadas en VisualStudio y la interfaz fue creada en CorelDRAW y se llegó al siguiente resultado:

a) b)

c) d)

e) f)

Figura 9. Maquinado: a) Interfaz del software, b) Posibles casos a analizar, c) Prisma cuadrangular abierto, d) Prisma cuadrangular cerrado, e) Cilindro abierto, f) Cilindro cerrado.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.2 Recipientes irregulares.

En el caso de la botella se manufacturó 4 formas de molde:

a) b)

c) d)

e)

Figura 10. a) Botella 1, b) Botella 2, c) Botella 3, d) Botella 4, e) Fundición de botella en cera.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Con la intención de obtener en físico cómo podría ser la botella, se recurrió a la técnica de fundir cera en los moldes para poder palpar la forma de las botellas. Como alternativa se puede recurrir a la impresión 3D.

4.Conclusiones.

Después de programar las ecuaciones en Visual Studio e introducir la cantidad y la densidad relativa del líquido a almacenar, se observó que coincidieron los resultados con los cálculos obtenidos manualmente, y de igual forma también fue posible comprobar que cuando fue construido el recipiente y se vertió sobre este el líquido realmente se cumplió con el fin que se propuso al inicio del proyecto. En lo que respecta a los cuerpos irregulares se manufacturaron 4 moldes y para construir la forma de la botella en físico se utilizó cera, para poder tenerlos físicamente. De manera adicional a estas comprobaciones, este trabajo nos proporciona la información técnica necesaria para que este proceso pueda ser difundido de una manera sencilla para su comprensión por personas interesadas en la manufactura de recipientes para líquidos.

Para trabajos posteriores se tiene la opción de trabajar en manufactura de moldes con venas de enfriamiento y seccionar el molde en tres partes. Y en el caso de los cuerpos geométricos regulares se pueden determinar las fuerzas hidrostáticas resultantes, así como calcular el espesor del material que se requiere para que pueda soportar la presión que se genera por el fluido almacenado.

Referencias Bibliográficas.

[1] Yunus C. Fundamentos de Mecánica de fluidos, Mc Graw Hill, México, 1era. Edición, 2006.
[2] Gieck K. Manual de fórmulas técnicas, AlfaOmega, México, 75 Edición, 2003
[3] Gómez S. El gran libro de SolidWorks, AlfaOmega, México, 2da. Edición, 2008
[4] Manual de Surfcam.
[5] Cruz F. Control numérico y programación II, AlfaOmega, México, 2011.
[6] Escamilla E. Metrología y sus aplicaciones, Grupo editorial Patria, 1era. Edición 2014.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 9, pp. 92-103.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Carro Robot de Carga, Sigue Muros y Evasor de Obstáculos con un Microcontrolador

De la Barrera González Alfredo[1,2,3]; Martínez Padilla Marco A.[1]; García Lamont, Farid[2]; Ruiz Castilla, J. Sergio[2]; Guevara López, Pedro[3].

[1] Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca, [2] Universidad Autónoma del Estado de México, [3] Instituto Politécnico Nacional.

Resumen

En este artículo se presenta un carro robot de aplicación, el cual sigue un muro para transportar una carga útil, el carro circula de forma paralela a un muro, utilizando sensores ultrasónicos, 2 por lado, 1 al frente y 1 posterior, es decir 6 sensores en total, con una separación preestablecida por el diseñador, para este caso la separación es de 30 cm del muro, en el caso que por alguna circunstancia el carro se separe o se acerque al muro, el sistema de control hará la corrección correspondiente para corregir a la separación preestablecida; en el posible caso de encontrar un obstáculo en su trayectoria intentará evadirlo haciendo un giro en sentido opuesto al muro; en el destino del carro lo espera una estación donde los tres sensores frontales miden una separación de 30cm, condición que hace que el carro se detenga, un operador lo espera para recoger la carga y regresar el carro a su punto de partida. El sistema de control se basa en un microcontrolador que procesa la medición de cada uno de los sensores y mediante amplificadores de potencia se operan 4 motores de c.d. con la finalidad de que el carro funcione adecuadamente al frente y en reversa.

Palabras clave: Robot sigue muros, robot de servicio, robot de carga, carro auto conducido.

1. Introducción

En la actualidad la robótica ha tenido un desarrollo creciente en la industria en general, habiéndose desarrollado de forma inicial y ampliamente en la industria automotriz en las líneas de ensamblaje de chasis y carrocería de automóviles, de tal forma que se reduzca la mano de obra que interviene en el ensamblado así como dando precisión primero a la colocación mediante un robot de tarea específica y en seguida al soldado de cada una de las partes, tarea realizada por otro robot, siendo que la mano de obra ahora debe ser especializada para la operación sincronizada de los robots de tarea específica; por otro lado y también en la industria automotriz se utilizan para el pintado uniforme de la carrocería. Existen robots fijos que pueden hacer el conexionado de la oblea de circuito integrado con los pines externos de conexión que tienen una mejor precisión; en el ensamblado de motores de automóviles, camiones y aviones se utilizan robots especializados programados para realizar una tarea específica. Además de que también se han desarrollado para servicio en otras áreas como la agricultura, la oficina, para uso doméstico como se menciona en [1].

Con el avance de la tecnología se han desarrollado robots móviles, en la actualidad, la tecnología emergente de los automóviles auto conducidos ha permitido desarrollar tecnología, de tal forma que este automóvil consta de varias secciones para controlar la velocidad de circulación con las condicionantes de seguir un camino predefinido, detectar obstáculos y evadirlos, reconocer cosas “pre aprendidas” con la finalidad de que el sistema de control pueda diferenciarlas como se menciona en [2], por ejemplo la forma de los semáforos de vialidades y sus diferentes colores y en base a esto continuar la circulación o detenerla, esta tecnología, debe detectar y reconocer obstáculos al frente y a los costados.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La utilización de diferentes tipos de sensores ha dado pie al desarrollo de diferentes tipos de sistemas para la detección de obstáculos de un robot móvil, en [3] se presenta un modelo que consta de una "franja" de detección de objetos utilizando sensores ultrasónicos; se presenta un proceso para extraer segmentos de mediciones der rango lineal y colineal adyacentes, y se presenta un algoritmo rápido para unir estos segmentos de línea a un modelo de los límites del espacio libre del robot. Algunas de las técnicas de auto conducción de móviles, es previamente colocando marcas en el camino para que el móvil las reconozca y siga dicha trayectoria, como se indica en [4], donde se presenta un algoritmo que se ejecuta en tiempo lineal en el número de puntos de referencia. Algunos sistemas utilizan la ubicación del móvil utilizando el sistema GPS, que es eficiente para entornos exteriores, pero para locales cerrados se prefieren sensores infra rojos o ultrasónicos, como se menciona en [5], combinados con un sistema de odometría, es decir la medición de la distancia y posición recorrida por el móvil, presentando un sistema que puede ser utilizado como un sonar para la detección de objetos pasivos. Las técnicas de detección de obstáculos para aplicaciones de prevención de colisiones en automóviles y vehículos aéreos no tripulados han sido de interés para la investigación en los últimos años. En [6] se presenta una aplicación de detección de obstáculos en la trayectoria de un móvil, utilizando sensores ultrasónicos, métodos de visión por ordenador, microcontroladores, etc. los que se utilizan para detectar obstáculos en la ruta, para permitir una movilidad sin colisiones de los usuarios.

El funcionamiento de este carro robot de carga, se basa en el sensado continuo de la separación de los objetos, muros u obstáculos que se detectan, se utilizan dos sensores por lado con la finalidad de que el carro avance de forma paralela al muro a una distancia de 30cm de separación, así como un sensor tanto en la parte frontal como en la posterior, debido a las posibles irregularidades del suelo o defectos mecánicos, es posible que el carro se desvíe de su trayectoria, con estos sensores laterales se mide constantemente la separación al muro y el sistema de control hace la corrección correspondiente; se cuenta con un sensor ultrasónico frontal con la finalidad de que se puedan sensar objetos u obstáculos en el sentido de la circulación, en el posible caso de detectarse a una distancia igual o menor de 60cm, el carro bajará la velocidad al 50% hasta estar a una distancia de 30 cm o menor, momento en que el sistema de control hará que gire en sentido opuesto al muro que se seguía, para esto los motores de las ruedas internas de la curva se les baja la velocidad al 25% y en las exteriores se mantiene al 50%, los sensores laterales continúan midiendo la separación de tal forma que el carro pueda rodear el obstáculo, con la finalidad de evadirlo, una vez que se detecta que de nuevo esta paralelo a un muro, la velocidad se cambia al 100% . El sistema de control está basado en un microcontrolador de la marca Microchip PIC16F886, el cual cuenta con las características suficientes para el control del carro, las salidas digitales se utilizan para controlar 4 amplificadores de potencia del tipo puente H con el circuito integrado L298, es decir uno para cada motor.

El presente trabajo presenta un carro robot de carga, teniendo una ruta paralela a un muro y que puede detectar obstáculos, utilizando sensores ultrasónicos que comúnmente son de corto alcance, típicamente de hasta 3.0 metros como el SFR04 como se describe en [7]; de acuerdo a las mediciones que hacen los sensores se permite la circulación de un carro de servicio o por otro lado se reduce la velocidad para evadir el obstáculo y llevar la carga útil a un destino paralelo a un muro. Se diseñó un prototipo de carro de carga, que pueda transportar una carga útil de 25kg, por lo que se dividió en dos secciones principales: la primera está formada por el diseño de los circuitos electrónicos compuestos por los sensores ultrasónicos, el circuito de control y los amplificadores de potencia y la segunda es el algoritmo para dar funcionamiento al carro, mediante la programación de un microcontrolador Microchip.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 9, pp. 92-103.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Desarrollo

2.1 Diseño de los circuitos electrónicos

El circuito de control está basado en un microcontrolador PIC16F886, que se describe en [8], este "lee" cada una de las mediciones de los sensores ultrasónicos, para conocer continuamente la distancia entre el carro y el muro que se sigue así como los posibles objetos u obstáculos en su entorno cercano, el circuito electrónico de control se muestra en la figura 1, donde se muestran las conexiones del microcontrolador, el pin *US_TRIGG* es la señal que inicializa la medición de cada sensor y con la finalidad de optimizar el uso de los terminales del microcontrolador es conectada de forma común con los seis sensores. Las terminales *ECHO_x*, son por donde se leen las señales de tiempo que provienen de los sensores, que su duración indica la distancia medida por el sensor correspondiente.

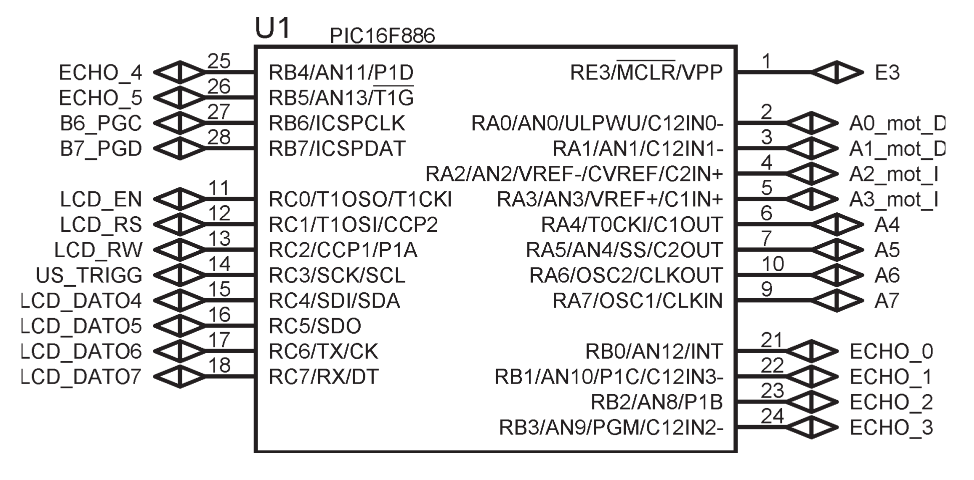


Figura 1. Microcontrolador y sus conexiones.

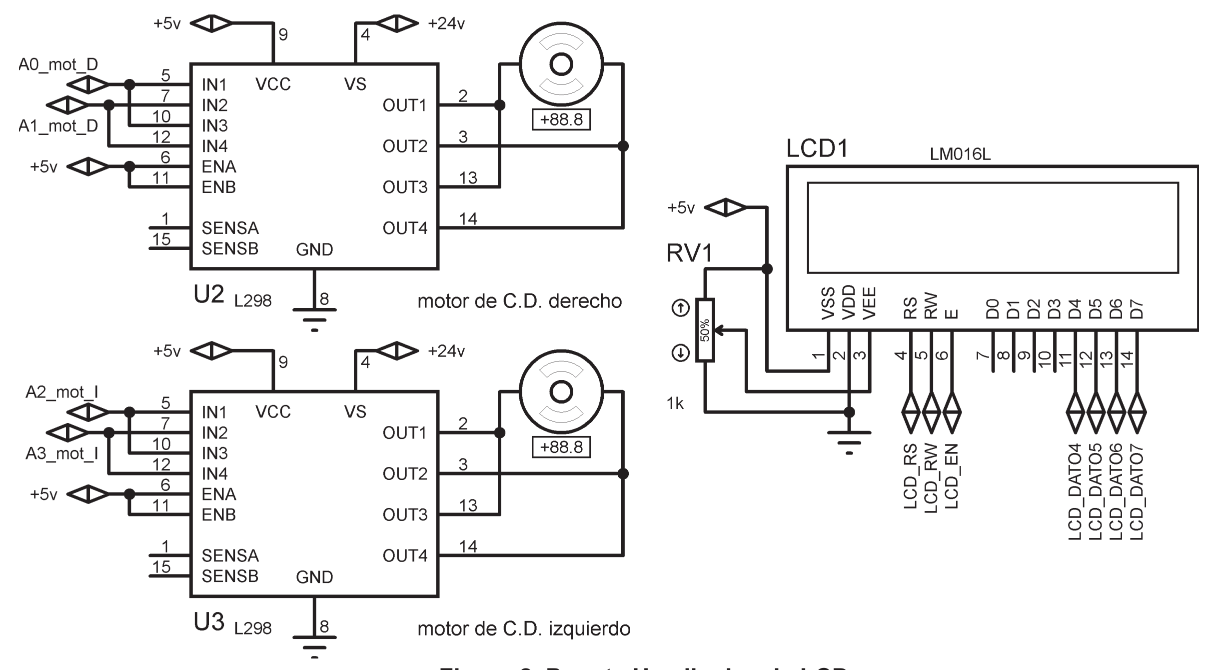


Figura 2. Puente H y display de LCD

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Las terminales *LCD_xxx*, se utilizan para conectar una pantalla de texto tipo LCD, por donde se puede visualizar cada una de las mediciones de distancia entre el carro y el muro, que proporcionan cada uno de los sensores; las terminales *Ax*, se utilizan para activar los motores, la A0 y A1 controlan los motores del lado derecho y A2 y A3 los motores lado izquierdo, de tal forma que el móvil pueda avanzar al frente y en reversa, estas señales a su vez son enviadas a un amplificador de potencia tipo puente H, donde se utilizó un circuito L298 que se describe en [9], utilizando uno para cada motor, como se muestra en la figura 2.

En la figura 3, se muestra la conexión del microcontrolador con los sensores ultrasónicos tipo SRF04, como se mencionó, la terminal *TRIGG* se conecta de forma común a cada sensor, y las señales *ECHO_x,* son individuales para cada sensor.

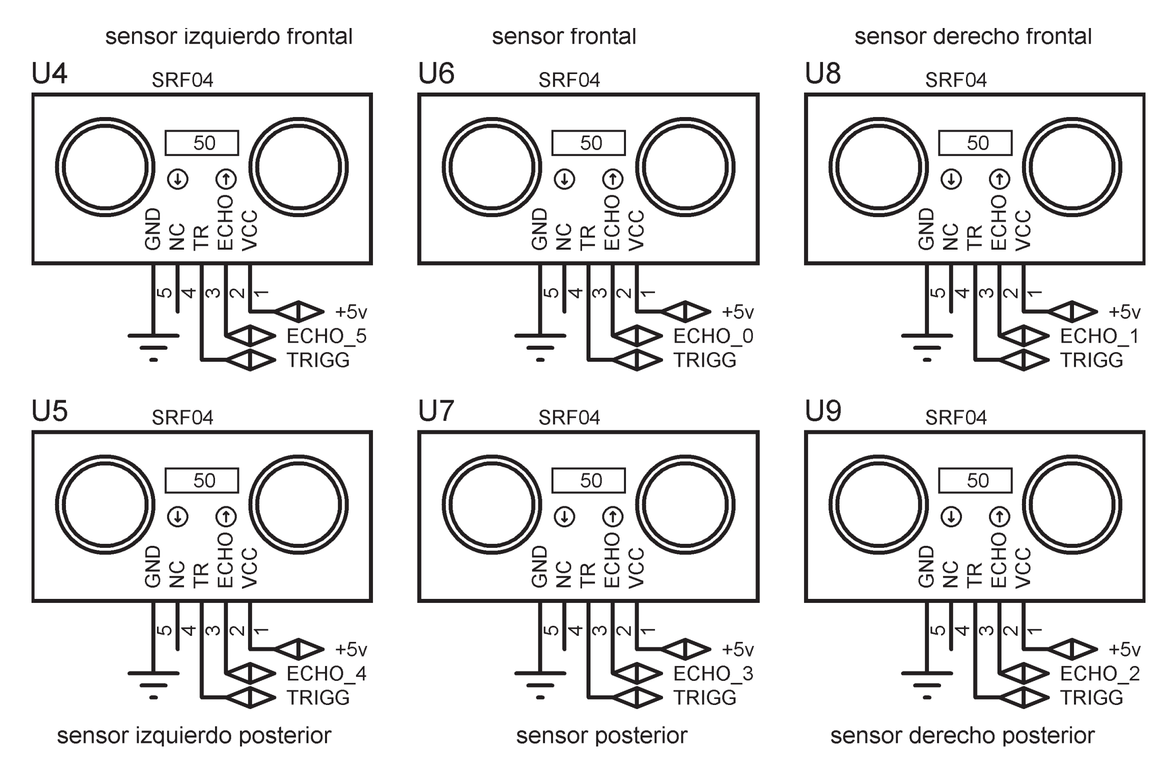


Figura 3. Conexión de los sensores ultrasónicos

La fuente de voltaje utilizada se hizo con 2 baterías de 12 volts en serie, ya que los motores funcionan a 24 volts, el voltaje de +5v, se obtuvo de un regulador 7805, el que está montado en la tarjeta comercial de cada uno de los puentes H, L298 que se utilizaron.

Se tiene el control de cuatro motores de C.D. los que se controlan por pares laterales, es decir se tienen dos líneas de control para manejar el sentido de giro de los motores lateral izquierdo así como dos líneas más para los motores laterales derechos.

2.2 Algoritmo y programación del microcontrolador

En esta sección se diseña el algoritmo de control, para la elaboración del programa para microcontrolador escrito en lenguaje C, con el compilador PIC-C, como se describe en [10].

En la figura 4, se muestra una representación de las acciones de corrección de la trayectoria, la cual ha sido exagerada, con la finalidad de que sea fácilmente comprensible el comportamiento del carro, en la posición *C_Pos1*, los motores de los costados tienen la misma velocidad; en la posición

ISBN: 978-607-9394-14-1.



C_Pos2, el carro se aleja de su trayectoria por lo que el sistema de control reduce la velocidad de las ruedas del costado derecho y mantiene las del lado izquierdo regresando el carro a la separación de referencia; en la posición *C_Pos4*, el carro reduce la distancia de referencia hacia el muro por lo que el sistema de control reduce la velocidad de las ruedas del costado izquierdo y mantiene las del lado derecho regresando el carro a la separación de referencia;

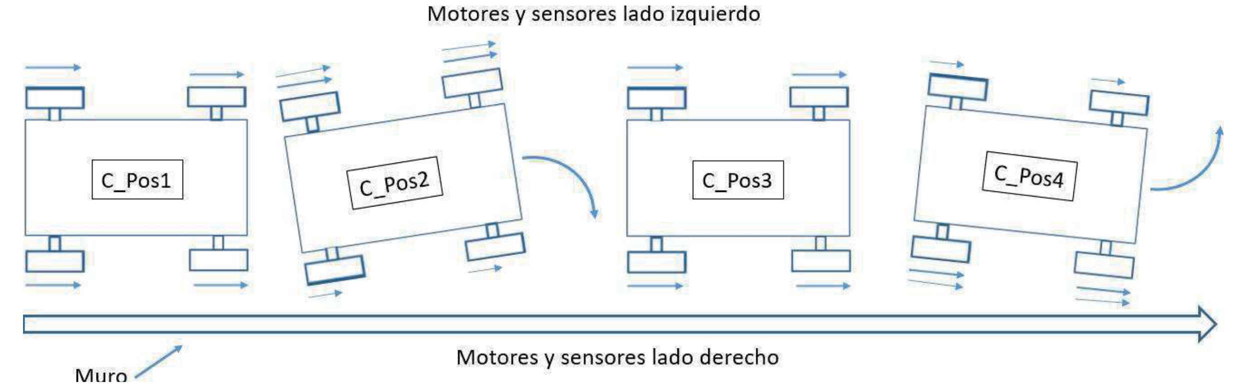


Figura 4. Acciones de corrección de trayectoria del carro robot.

Con relación al cambio de orientación del carro una vez que detecta un obstáculo, es importante señalar que el carro avanzará evadiendo el obstáculo del lado contrario al muro que sigue, es decir el sensor frontal detectará el obstáculo y el sensor lateral delantero derecho tendrá una medición mayor que la de referencia por lo que el sensor lateral posterior es el que servirá de medición comparando la referencia y corrigiendo la trayectoria. En este carro no se considera aun la medición de la orientación geográfica como variable.

Se cuenta con un interruptor de encendido y otro de 2 posiciones para indicar el sentido de avance, el cual se conecta en el terminal *B7_PGD*, pudiendo tener dos valores lógicos, 1 avanza hacia el frente y 0 avanza en reversa; una vez que el carro avanza al frente, la velocidad de los motores es la máxima en caso de no detectarse obstáculo al frente, en caso de alejarse del muro se accionará la corrección correspondiente bajando la velocidad de los motores laterales derechos al 50% y manteniendo los de la izquierda al 95%; en el caso de acercarse al muro entonces se baja la velocidad de los motores izquierdos al 50% y se mantiene la de los derechos al 95%; en la situación en que la separación del carro sea la establecida como referencia, entonces los motores mantienen la velocidad al 95%.

Si se encuentra un obstáculo al frente, a una distancia menor de 2 veces la distancia de referencia se reduce la velocidad al 50%, haciendo las correcciones de acercamiento o alejamiento del muro. Si el obstáculo se encuentra a una distancia menor de la referencia el carro girará hacia la izquierda pero manteniendo la separación del muro, es decir el carro evadirá o rodeará el obstáculo.

En el lugar de destino se cuenta con una estación donde el carro entra, la cual tiene una separación ente muros de la distancia de referencia, por lo que de esta manera el carro determina que ha llegado al destino al tener la medición de los 3 sensores, frontal y laterales frontales midiendo la distancia de referencia o menor, de forma simultánea, por lo que bajo esta condición el carro se detiene.

Debido a que el carro es de estructura de 4 motores fijos con sus 4 ruedas, y suponiendo que la trayectoria actual es siguiendo el muro del lado derecho, para hacer un giro se baja la velocidad de los motores del lado izquierdo y se mantiene la velocidad del lado derecho, de tal forma que el carro pueda girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, sin dejar de avanzar. En el posible caso que se requiera de hacer un giro del carro, a los motores del lado izquierdo se les cambia de polaridad de tal forma que giren en sentido inverso, es decir que avancen en reversa al carro solamente de ese costado y los motores del lado derecho se les aplicará corriente de tal forma que avancen en sentido hacia el frente y de forma simultánea, de esta forma se hace un giro sobre el centro geométrico del

ISBN: 978-607-9394-14-1.



carro, como se muestra en la figura 5, donde las flechas indican el sentido de giro de las ruedas, ya sea para girar a la derecha o a la izquierda.

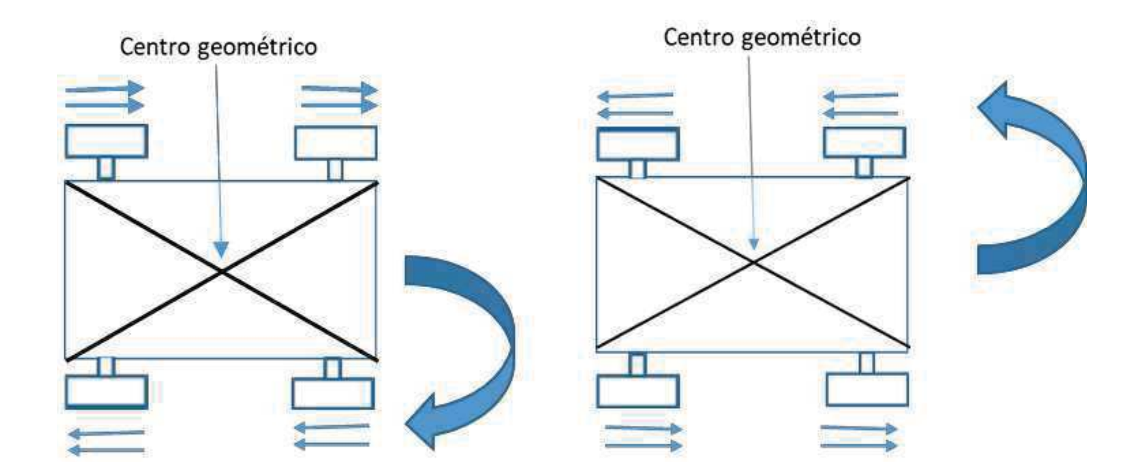


Fig. 5 Implementación de giro del carro robot.

El programa para microcontrolador, como se mencionó, se escribió con el compilador PIC-C, el primer segmento inicializa el funcionamiento del microcontrolador, declara variables y reserva las localidades necesarias; en la función principal, es decir en *main*, se configura el TMR0 para que genere una interrupción cada 50µs con la finalidad de que se generen tres señales de PWM a 1kHz, que serán aplicadas a los motores, para activarlos con velocidades de 25, 50 y 95%, como se muestra en la figura 6 que es un listado del segmento de interrupción que genera una función de PWM, con la que se obtienen velocidades de los motores de 25, 50 y 95% de ciclo de trabajo y de esta forma se obtiene el cambio de velocidad. Es importante mencionar que el programa principal indica la velocidad a la que debe de moverse el carro, luego de que ha obtenido las mediciones de los sensores y ha hecho las comparaciones necesarias, de separación del muro e identificación de objetos u obstáculos.

```
#int_TIMER0  // cada 50uS; para 1kHz son 20 interrupciones
void clock_isr()
{++C_PWM;
if(C_PWM>=5)
   {P_25=0;}
if(C_PWM>=10)
   {P_50=0;}
if(C_PWM>=19)
   {P_100=0;}
if(C_PWM==20)
   {P_25=1; P_50=1; P_100=1; C_PWM=0;}
```

Figura 6. Segmento de interrupción para generar PWM

La forma en que se aplica el PWM, se muestra en la figura 7, donde con los valores asignados por el programa principal para las velocidades de los motores derechos e izquierdos, se determina como se aplicará cada una de las 3 señales de PWM, que inician en el mismo instante pero con ciclo de trabajo de 25, 50, y 95%, como se había indicado antes. El segmento de la figura 7, es la parte complementaria de la función de interrupción del TMR0.

Dentro del programa principal y dentro de un ciclo infinito, se leen de forma secuencial cada uno de los sensores, almacenando las mediciones en una variable indexada como se muestra en la línea 93 de la figura 8, este segmento optimiza el uso de localidades de programa, así como se obtiene un

ISBN: 978-607-9394-14-1.



programa compacto almacenando las mediciones en un arreglo de una dimensión; ya con las mediciones de cada sensor se compara cada una con una referencia, es decir con respecto a la distancia de separación del muro y se hacen las correcciones necesarias para que la trayectoria sea paralela al muro.

```
switch(vel)
{case 22:
   {if(P_25){output_high(pin_A3);output_high(pin_A1);}
    else {output_low(pin_A3);output_low(pin_A1);}
   break;}
case 25: {if(P_25) {output_high(pin_A3);}
   else{output_low(pin_A3);}
   if(P_50){output_high(pin_A1);}
   else {output_low(pin_A1);}
   break;}
case 52:{if(P_50){ output_high(pin_A3);}
  else {output_low(pin_A3);}
  if (P_25){output_high(pin_A1);}
  else {output_low(pin_A1);}
  break;}
case 55:{ if (P_50){output_high(pin_A3);output_high(pin_A1);}
  else {output_low(pin_A3);output_low(pin_A1);}
  break;}
case 59:{if(P_50){ output_high(pin_A3);}
  else {output_low(pin_A3);}
  if(P_100){output_high(pin_A1);}
  else {output_low(pin_A1);}
  break;}
case 95:{if (P_100){output_high(pin_A3);}
  else {output_low(pin_A3);}
  if(P_50){ output_high(pin_A1);}
  else {output_low(pin_A1);}
  break;}
case 99:{if (P_100){ output_high(pin_A3);output_high(pin_A1);}
  else {output_low(pin_A3);output_low(pin_A1);}
  break;}
case 0:
default: {output_low(pin_A3);output_low(pin_A1);}
 }
}
```

Figura 7. Segmento de código para aplicación de las señales PWM

```
// lee sensores US
for(i=0;i<SUSx;i++)
  {output_high(pin_C3);
  delay_us(30);
  output_low(pin_C3);
  while(!input(echo[i]))
    {;}
  set_timer1(0);
  while(input(echo[i]))
    {;}
  tiempo=get_timer1();
  dist[i]=(tiempo*0.0345);   // calcula distancia en cm
  printf(LCD_PUTC,"\ftiempo=%Lu uS",tiempo);
  printf(LCD_PUTC,"\nsens[%u]=%3.1fcm",i,dist[i]);
  }
```

Figura 8. Segmento de código que lee los 6 sensores.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la figura 9, se presenta el segmento de código donde inicialmente se identifica si el sentido de avance es hacia el frente a partir de la línea 116, o en reversa a partir de la línea 148; a partir de la línea 122 se compara la distancia medida por cada uno de los sensores contra la referencia preestablecida, para determinar la velocidad de los motores de avance o la estrategia para la evasión de obstáculos; la referencia se declaró en la inicialización del programa y se determinó que sería de 30cm, la cual es definida por el programador.

```
116  if(input(PIN_B7)) // lee switch de sentido de avance;
117     {flag=1;}
118  else {flag=0;}
119
120  // control, sin obstaculo al frente
121  if(flag)
122   {if((dist[0])>(2*dist_ref))
123    {if((dist[1]>dist_ref)&&(dist[2]<dist_ref))
124        {vel=95;}        //1000b, 8
125     if((dist[1]<dist_ref)&&(dist[2]>dist_ref))
126        {vel=59;}        //0010b, 2
127     if((dist[1]>dist_ref)&&(dist[2]>dist_ref))
128        {vel=95;}        //1000b, 8
129     if((dist[1]==dist_ref)&&(dist[2]==dist_ref))
130        {vel=99;}        //1010b, 10
131    }
132  // hay obstaculo al frente, baja velocidad
133  // esquiva o rodea obstaculo
134   else{if((dist[1]>dist_ref)&&(dist[2]<dist_ref))
135        {vel=52;}        //1000b, 8
136     if((dist[1]<dist_ref)&&(dist[2]>dist_ref))
137        {vel=25;}        //0010b, 2
138     if((dist[1]>dist_ref)&&(dist[2]>dist_ref))
139        {vel=52;}        //1000b, 8
140     if((dist[1]==dist_ref)&&(dist[2]==dist_ref))
141        {vel=55;}        //1010b, 10
142    }
143
144  // llega al destino
145  if((dist[0]<=dist_ref)&&(dist[1]<=dist_ref)&&(dist[5]<=dist_ref))
146      {vel=0;}
147    }
148  // else // flag=0, el carro avanza en sentido de regreso
149   }
150  }
```

Figura 9. Segmento de código que determina el avance del carro.

3. Resultados

Para el funcionamiento del carro robot de carga, se diseñó y manufacturó un chasis de aluminio con la finalidad de que en este se instalaran cada uno de los componentes, tal como se muestra en la figura 10, donde se aprecia el chasis, los 6 sensores ultrasónicos y 2 de los 4 motores; se debe resaltar que se diseñó un cople de tal forma que la flecha o vástago del motor sujetara a la rueda, una vez funcionando se manufacturaron un total de 4 piezas.

El algoritmo del programa se diseñó de tal manera que el robot siga una separación constante a la referencia la cual fue elegida de manera que se mantenga seguro el material u objetos a trasladar, por lo tanto la distancia en la que el robot tendrá su trayectoria será de 30 centímetros. Cada sensor

ISBN: 978-607-9394-14-1.



que contiene el robot estará midiendo continuamente de manera que se encuentren objetos y obstáculos como un muro y se active la acción de avance correspondiente, en la figura 11 se presenta el prototipo del carro robot de carga, mostrando las 2 baterías de 12v que en serie proporcionan los 24v necesarios para los motores, el circuito de control con el display tipo LCD, los 4 puentes H uno para cada motor, 2 de los motores; donde todos los componentes están montados sobre el chasis de aluminio.

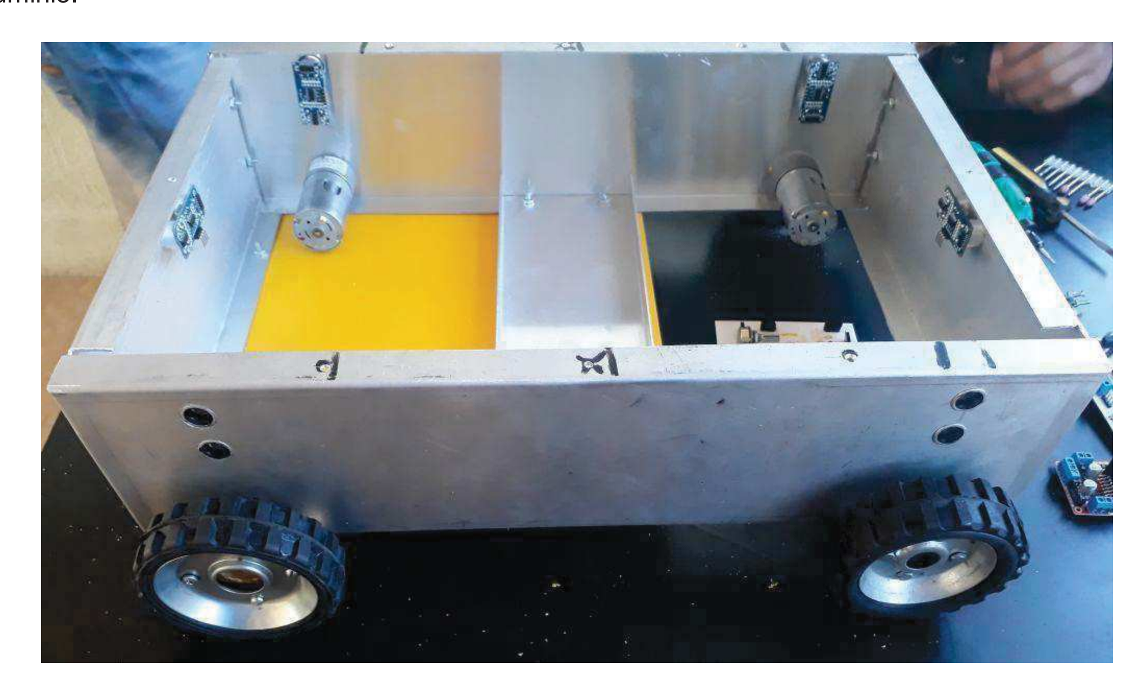


Figura 10. Chasis mostrando los 6 sensores y los motores

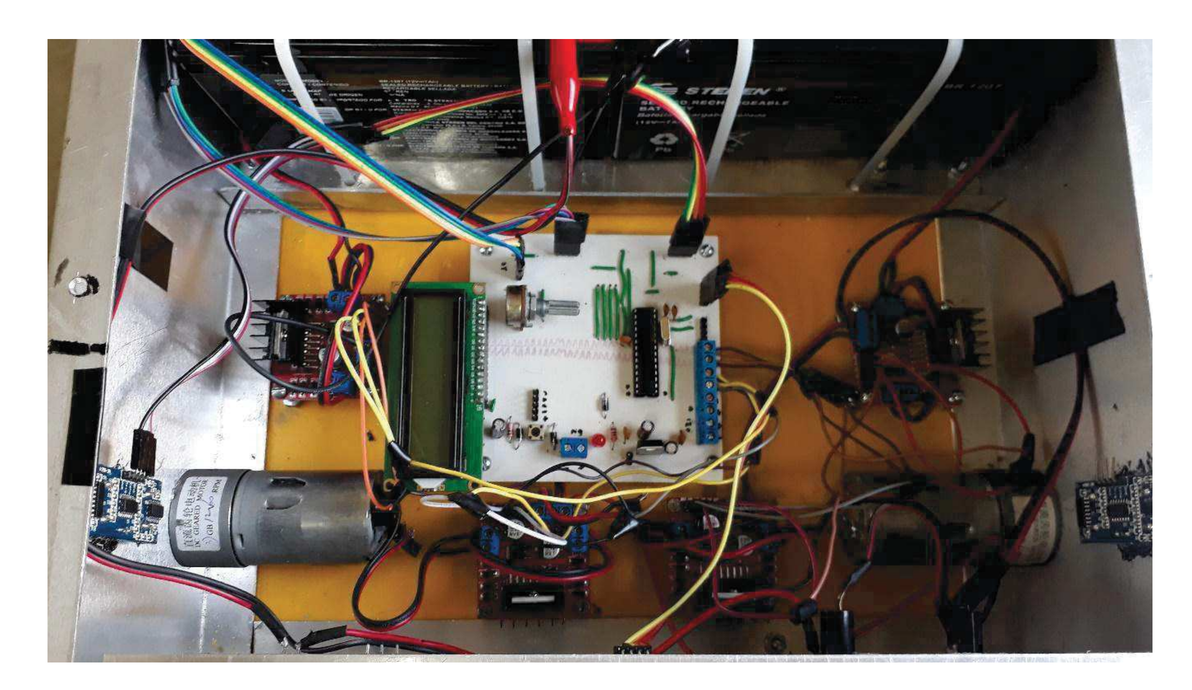


Figura 11. Interior del carro robot de carga.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En el oscilograma de la figura 12, se aprecia el resultado de la generación de cada una de las señales de PWM, que se obtienen del segmento de programa de interrupción del microcontrolador, que son aplicadas a los motores de acuerdo a la velocidad determinada por el algoritmo de control, que son 25%, 50% y 95% en orden descendente en la figura; el PWM, se diseñó a 1kHz con 1ms de periodo y se obtuvo a 990Hz, con un periodo de 1.01ms.

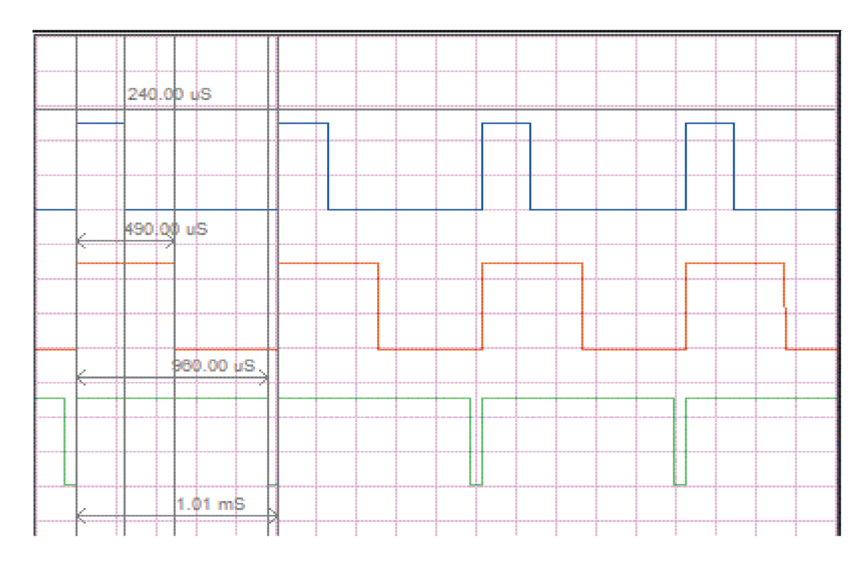


Figura 12. Oscilograma de las señales de PWM, para variar la velocidad de los motores.

En la figura 13 se muestra el carro transportando un objeto y siguiendo una trayectoria paralela a un muro, tal como se había especificado. Los motores se seleccionaron de tal manera que la carga útil fuera de 25kg, aunque considerando el peso muerto, los motores tienen la capacidad de transportar 32kg, es decir cada motor tiene una capacidad de 8kg.

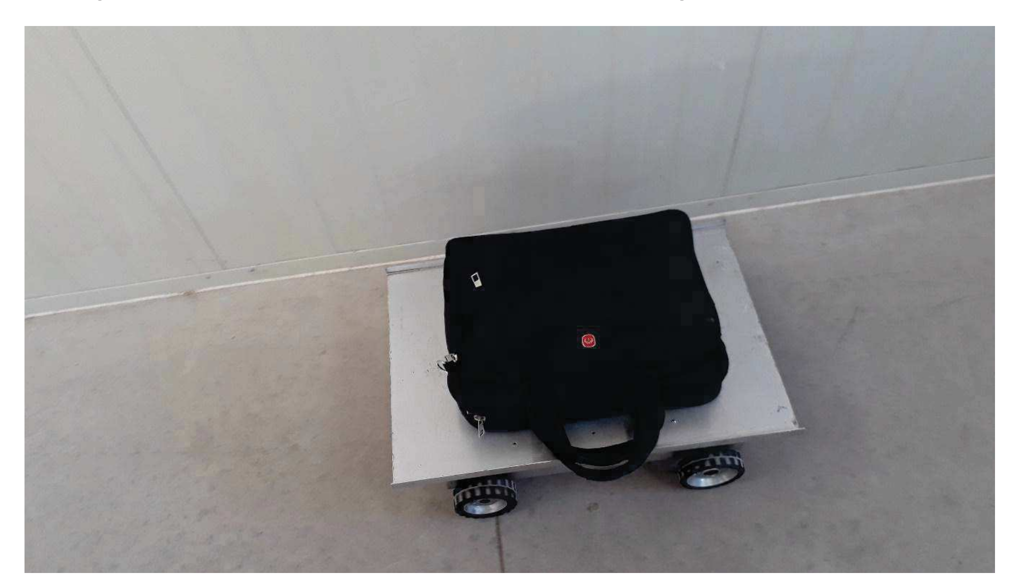


Figura 13. Carro transportando un objeto.

Debido a que el ángulo de emisión de la onda sonora, es decir el patrón de radiación sonora del sensor ultrasónico es de 30° y que los sensores son fijos al chasis, el carro seguirá la trayectoria siempre que el error de desviación sea menor de 15° respecto a la dirección de su trayectoria, de tal forma que el rebote de la onda ultrasónica sea captado por los sensores.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



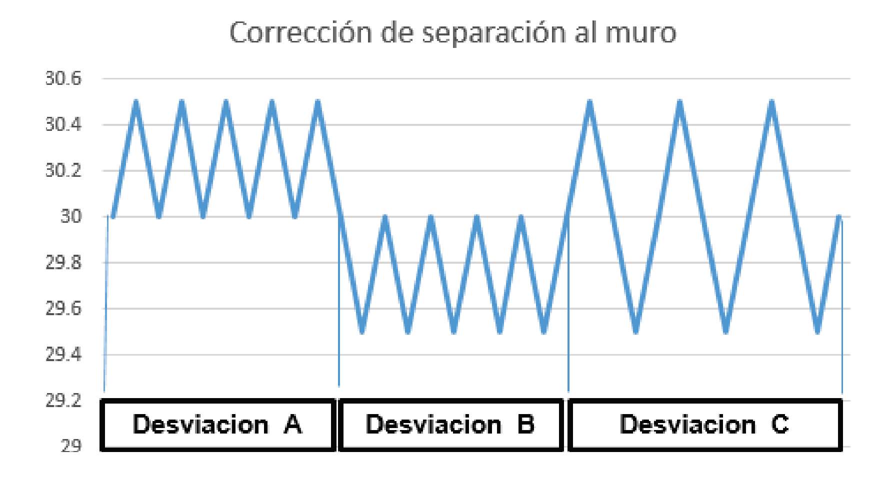


Figura 14. Grafica de la posible variación de separación del carro al muro

En la figura 14, se aprecia el posible error de desviación debido a la separación del carro; en la *Desviación A*, por alguna circunstancia el carro se desvía separándose del muro y el sistema de control hace la corrección, regresando el carro a mantener la separación de 30 centímetros de referencia; en la *Desviación B*, por alguna circunstancia el carro reduce su separación del muro y el sistema de control hace la corrección regresando el carro a mantener la separación de 30 centímetros de referencia; en la *Desviación C*, que pudiera ser el caso extremo, por alguna circunstancia el carro aumenta su separación del muro y el sistema de control hace la corrección regresando el carro a mantener la separación de 30 centímetros de referencia, pero este se separa en demasía, por lo que el sistema de control hace la corrección y existe la posibilidad de que el carro en su avance de la trayectoria describa una oscilación en su camino; pudiendo esto considerarse como los posibles casos de comportamientos del error que tiene el robot al desplazarse de forma paralela al muro.

4. Conclusiones

Se implementó el chasis con los debidos barrenos para dar soporte a cada uno de los sensores ultrasónicos así como los motores, de tal manera que tuvieran un nivel uniforme con relación al suelo, se diseñó un circuito electrónico con el que se pudiera dar funcionalidad al carro robot siendo un circuito de control basado en las distancias medidas por seis sensores ultrasónicos y una etapa de potencia para cada motor, además de que se diseñó un algoritmo de avance del carro de carga y evasión de objetos en el caso de estar cercanos, el cual se programó para un microcontrolador Microchip.

Se hicieron pruebas de funcionamiento y el carro avanzó de forma paralela a un muro, evadiendo obstáculos pequeños, teniendo algunas dificultades cuando el muro continuaba en ángulo recto a la izquierda o a la derecha de la trayectoria del carro, por lo que para solventar esta dificultad en la siguiente etapa de esta investigación se instalarán cada uno de los sensores frontales sobre un servo motor, diseñando el hardware necesario así como el algoritmo y programación para el microcontrolador, con la finalidad de mejorar el sensado de obstáculos en la trayectoria y esto pudiera contribuir al aumento de la velocidad de avance del carro robot, así como tener una mejor perspectiva del entorno por donde circula el carro.

El prototipo del carro es funcional y cumple con las expectativas del diseño de la investigación inicial, así como con las características para poder evolucionarlo con la instalación de un sensor LEADER para trayectorias rectas y curvas e integrar un sistema de dirección con movimiento de las ruedas delanteras haciendo un sistema de dirección y tracción diferencial eléctricos así como la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



instalación de cámaras de video, aplicar inteligencia artificial y manejo de imágenes, de tal forma que en el futuro cercano pueda ser un carro auto conducido con tecnología nacional.

Los autores agradecen los apoyos recibidos por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca; la Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario Texcoco y al Instituto Politécnico Nacional.

Referencias

[1] A. O. Baturone, *ROBÓTICA Manipuladores y Robots Móviles*, Barcelona: Ed. Marcombo, 1a edicion, año 2001.

[2] Cruz, P. P. ; de la Cueva Hernández, V. M.; y Ponce Espinoza, H.; *Robótica aplicada con LabVIEW y LEGO, ALFA OMEGA*, 1a edicion, año 2015.

[3] Crowley, J. L. *World modeling and position estimation for mobile robot using ultrasonic ranging.* Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation. IEEE vol. 2, páginas: 674 – 680, Año 1989.

[4] M. Betke, L. Gurvits, *Mobile robot localization using landmarks*. Intelligent Robots and Systems '94. Advanced Robotic Systems and the Real World, IROS '94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference, páginas: 135 – 142, Año: 1994.

[5] Eckert, J.; Koeker, K.; Caliebe, P; Dressler, F; German, R. *Self-localization capable mobile sensor nodes*. IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications. Volumen 1, páginas: 224 – 229, Año: 2009.

[6] Navya Amin, N., Borschbach, M. *Quality of obstacle distance measurement using Ultrasonic sensors and precision of two Computer Vision-based obstacle detection approaches*. International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS). Páginas: 1 – 6, Año: 2015,

[7] Sensor Ultrasónico SRF04, hoja de datos, www.rapidelectronics.co.uk consultada en octubre del 2017.

[8] Microcontrolador PIC 16F886, hoja de datos http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41291D.pdf, consultada en agosto del 2017.

[9] Puente H L298 hoja de datos, http://www.st.com/en/motor-drivers/l298.html, consultada en noviembre del 2017.

[10] Compilador PIC-C, http://www.ccsinfo.com/ccsfreedemo.php , consultada en noviembre del 2017.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 10, pp.104-121.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño y Construcción de un Prototipo de Prótesis de Bajo Costo Controlada por Señales Mioeléctricas

Hurtado Manzanera Pedro Antonio, Luviano Cruz David, García Villalba Luz Angelica y Vidal Portilla Luis

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El objetivo de la presente investigación es realizar el diseño y la construcción de una prótesis a nivel transradial impresa de una mano la cual reciba órdenes desde un sistema mioeléctrico que es ubicado en el brazo de la persona con discapacidad. El prototipo del diseño presentado fue generado por medio de una impresora 3D buscando que los costos de diseño y construcción se mantuvieran bajos, a su vez para asegurar el desarrollo seguro del prototipo se generaron análisis estáticos estructurales a las partes que componen el mismo de los cuales se obtuvieron resultados que brindan confianza al diseño planteado.

Palabras clave: Sistema mioeléctrico, prótesis transradiales, impresión 3D.

1. Introducción

Estudios realizados por el INEGI, tan solo en 2010 en México, 664 mil personas sufrieron la pérdida de pie, pierna o brazo, de este dato el 35% está representado por que no cuentan con mano. Actualmente en México existen bastantes personas con la discapacidad de poder mover o incluso de no contar con brazo y/o mano, dentro del sistema médico no se incluye entre su plan de salud la opción de poder adaptar a una persona una prótesis robótica, pudiendo solo optar por tener un gancho o algo no funcional para su necesidad. Es importante destacar que México es un país manufacturero, donde la mayoría los empleos requieren de ambas extremidades, las cuales aún son muy caras y es por ello por lo que para el servicio de sistema de salud el tema de una prótesis totalmente funcional es aún algo que les queda lejos de emplear, sin dejar de lado que a la vez se encuentra presente la falta de prototipos accesibles.

La mano humana está compuesta por 27 huesos los cuales están divididos en tres importantes grupos clasificados de la siguiente forma: el carpo, los metacarpianos y las falanges, por su estructura la mano está conectada a la muñeca esto a través de la palma, y contiene en su totalidad veinte grados de libertad, los cuales son accionados por aproximadamente 31 músculos, además de esto la mano humana cuenta con más de 25 grados de libertad [1].

La mano es la parte terminal del miembro superior, debido a la aportación al ser humano, es una de las partes más importantes del cuerpo. Está brinda acciones las cuales son necesarias para la supervivencia o relación con el medio ambiente. A la vez la mano tiene funciones múltiples entre las que destaca la prensión y el tacto. El dedo pulgar contiene el mayor porcentaje de importancia en la mano, ya que sin este la capacidad de la mano se podría reducir hasta un 40% [2].

Debido a lo anterior, en el caso de amputación de la mano es necesario hacer uso de prótesis que intenten mitigar la pérdida del miembro, todo esto mediante la incorporación de movimientos en la prótesis que asemejen la mano humana. Las prótesis son elementos creados con la finalidad de reemplazar un miembro o solo una parte de este, esto a su vez ayuda en el desarrollo psicológico del amputado, ya que crea una percepción de la mecánica del cuerpo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La primera prótesis conocida data del año 2000 a. C., el descubrimiento de esta fue en el cuerpo de una momia a la cual estaba sujeta con un cartucho al antebrazo. Fue en el siglo XVI cuando el diseño de las prótesis del miembro superior se fue mejorando. En este siglo se desarrolló el primer brazo artificial móvil hasta el nivel del codo, el cual fue llamado “Le petit Loraine”, contaba con la habilidad de poder abrir los dedos o cerrarlos por medio de una palanca.

En Alemania se dio el inicio de las prótesis activadas por medio de los músculos, mediante varillas de marfil, las cuales pasaban a través de los túneles cutáneos y con esto era posible que la prótesis se moviera por medio de la contracción de los músculos. En 1946 se diseñaron prótesis asistidas, esto por medio eléctrico o neumático [3].

En el año de 1960, en Rusia, se tuvo conocimiento de la primera prótesis mioeléctrica. Este tipo de prótesis funciona con la contracción de los músculos, después de captar los datos por medio de sensores, se amplifican y envían a los actuadores de la prótesis. Las prótesis mioeléctricas son controladas por un medio externo el cual sintetiza las señales y las envía a la tarjeta de control. Estas son hoy el miembro con más alto grado de rehabilitación, ya que no requieren de arneses o medios de suspensión [3].

Estas prótesis están basadas en el concepto de que siempre y cuando un musculo se contraiga, se produce una señal eléctrica muy pequeña. Existen sensores que entran en contacto con la piel para poder así registrar la señal de contracción. Esta debe de ser amplificada dado lo pequeña que es (5-10 µv), así es enviada al controlador y este encenderá o apagará los motores eléctricos de los actuadores para poder sujetar o soltar objetos con la mano.

Actualmente existen en el mercado varios tipos de diseños de manos que trabajan con señales mioeléctricas tal como la CyberHand la cual cuenta con 3 dedos y es totalmente articulada [4], la mano Michelangelo está recubierta de elastómero de silicona la cual reemplaza las estructuras blandas [5], sin embargo, el modelo anterior es de alto costo lo que impide que el uso de las manos mioeléctricas se extienda en la población de escasos recursos en México. Esta prótesis, se muestra en la figura 1, contiene en su estructura tres dedos, los cuales con totalmente articulados y tienen movimientos independientes, siendo estos impulsados por un total de seis micromotores, y se encuentran conectados por electrodos a los nervios de la persona, con esto el paciente es capaz de sentir presión y la temperatura a la cual se podría estar sometiendo la prótesis [6].



Figura 1. Mano CyberHand.

Otro ejemplo más que se debe resaltar es la mano biónica Michelangelo, figura 2, la cual fue diseñada a cargo de la empresa Otto Bock. Michelangelo se encuentra construida a base de acero y duraluminio los cuales son de alta resistencia, a la vez está recubierta de elastómero de silicona la cual reemplaza las estructuras blandas, así como otros plásticos los cuales son de alta tecnología y sustituyen músculos y tendones. La caracterización principal son sus seis grados de libertad, sin dejar de lado la alta variedad de movimientos, los cuales permiten que la mano sea totalmente flexible. Un punto importante y sobresaliente es la resistencia al agua, lo que le permite trabajar a tres metros de profundidad [6].

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 2. Mano Michelangelo. [6]

Las prótesis mioeléctricas son sistemas accionados por servomotores, que son controlados por señales electromiografías superficiales (EMGS), las cuales son intramusculares; existen sensores que pueden ser mediante agujas o electrodos colocados en el muñón del paciente para así capturar la señal superficialmente.

Al estudio generado a la actividad eléctrica de los músculos se le denomina electromiografía. La contracción que se genera al cerrar la mano es por células que se activan neurológicamente y se produce la señal eléctrica por la excitación generada en estas. [7]

Para concluir con este apartado se describe una de las manos mas avanzadas desarrollada por investigadores del Instituto de Robótica y Mecatrónica del Centro Aeroespacial alemán, mostrada en la figura 3, esta mano puede absorber altos impactos, tomando como ejemplo el ser golpeada con un bate de beisbol. Cuenta con 19 grados de libertad y es capaz de ejercer una fuerza de 30 Newtons [8].

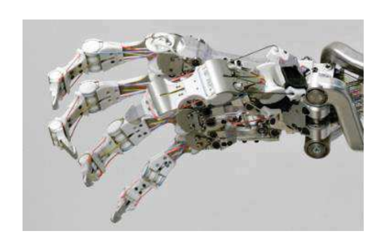


Figura 3. Mano construida por el Instituto de Robótica y Mecatrónica. [8]

2. Metodología

Las metodologías de desarrollo se refieren a la estructuración y el control de un sistema. A lo largo de los años han evolucionado diversas metodologías de desarrollo, esto dado a que existen diversos proyectos que se pueden manejar de diversas maneras según les convenga [9]. En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del prototipo planteado el cual se describe a continuación. Como primera etapa para nuestro proyecto identificamos los requerimientos para poder comenzar a trabajar con el sistema que se plantea en la presente investigación, como ejemplo análisis de la electromiografía y señales fisiológicas. Pasamos a una segunda etapa la cual es la del desarrollo de diseño del sistema, donde se analizan las áreas de oportunidad para adaptación de sistemas mecánicos y eléctricos, además de analizar medidas promedio de la mano según estudios ampliamente realizados. Posteriormente seguimos con la tercera que es la verificación de trabajo del sistema en donde se realizan pruebas de reconocimiento de movimientos musculares y finalmente con la operación en conjunto de todos los componentes.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 10, pp.104-121.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



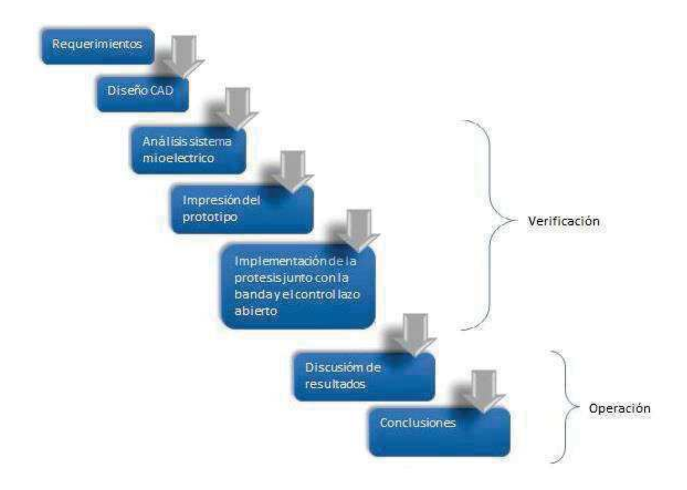


Figura 4. Metodología del prototipo.

2.1 Diseño de la prótesis

Para poder obtener el movimiento en la mano diseñada, se optó por utilizar el método de transmisión de barras, la cual incluye tendones artificiales los cuales pasarán por dentro de las articulaciones diseñadas efectuando el movimiento, estos tendones estarán conectados a motores ubicados en el antebrazo, al efectuarse un movimiento en los servomotores estos harán que se realice una flexión en los dedos, logrando así con esto poder abrir y cerrar la mano. Los servomotores están instalados en el antebrazo de la prótesis con la finalidad de minimizar el peso.

El diseño fue realizado mediante SolidWorks, el cual es ampliamente utilizado en las industrias y escuelas de ingeniería ya que permite de manera libre realizar el diseño y a su vez realizar análisis mecánicos de las estructuras [10].

Falanges: El dedo diseñado consta de tres falanges, siendo estas catalogadas como proximal, media y distal. Las medidas utilizadas para el dedo índice están basadas en las longitudes promedio de los habitantes en México según INEGI [11], la tabla 1 muestra las longitudes usadas.

Tabla 1. Medidas del dedo índice.

Falange	Medidas en mm
Proximal	44
Media	29
Distal	25

El diseño de las tres falanges que componen el dedo se muestra en las figuras 5, 6 y 7, las falanges cuentan con un corte a 45 grados, esto ayudará a que cuando trabajan en conjunto las tres piezas puedan realizar el movimiento encomendado, junto a esto se plantea que cuando el dedo se cierre este tenga el límite natural que tienen los dedos humanos.

Dedos: Los dedos están conformados de tres links los cuales están impresos individualmente y son vinculados por medio de un tendón artificial. Este tendón corre a través de las falanges, que a la vez cuentan con canales en su interior que facilitan el trabajo en conjunto a las tres partes. La principal función de este tendón es mantener unidas las partes y sujetas a la palma. A la vez las tres partes cuentan con una perforación frontal por la que pasa un hilo de nailon de pesca que está conectada hasta los servomotores. El diseño de los dedos se muestra en las figuras 8 y 9.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



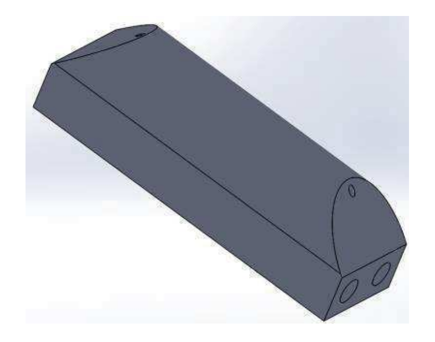


Figura 5. Falange proximal.

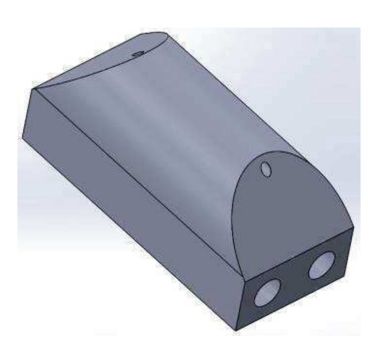


Figura 6. Falange media.

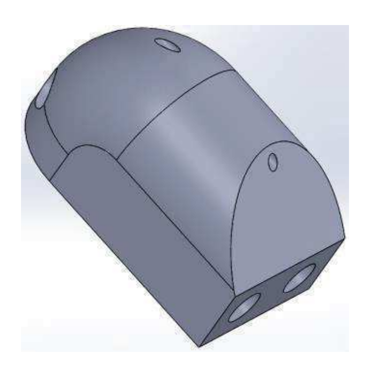


Figura 7. Falange distal.

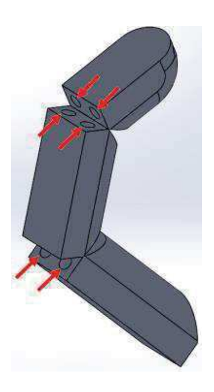


Figura 8. En color rojo se señalan los canales por donde pasara el tendón artificial, uniendo así las tres partes.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



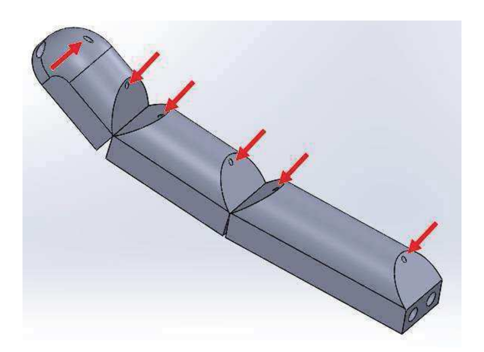


Figura 9. Los canales por donde pasa el cordón de pesca, haciendo girar así las partes hacia enfrente.

Una vez que el servomotor se acciona este tensa el cordón de pesca y el dedo tendrá como resultado final una rotación en sus tres partes en las que se compone, logrando que quede cerrado, con lo que se podrían sujetar diversos artefactos. Una vez que el servomotor vuelve a su posición inicial, retira la fuerza ejercida sobre el nailon de pesca y entra en función el tendón artificial que por su forma hace volver a la posición inicial a las tres partes, esto se muestra en la figura 10.

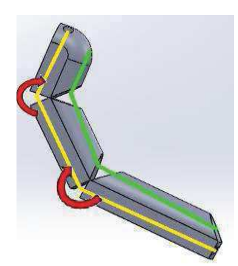


Figura 10. Dedo índice mostrando el tendón artificial en color amarillo, en color verde se muestra el cordón de pesca y a la vez se muestra al sentido de la rotación en color rojo.

Pulgar: El dedo pulgar sigue el mismo patrón de diseño, pero este al igual que la mano humana consta de dos falanges, la falange proximal y distal. De la misma manera cuenta con canales interiores los cuales sirven para conducir el tendón artificial, y los mismos orificios frontales para conducir el cable de nailon conectado hasta el servomotor. El pulgar en este diseño proporciona solo un grado de libertad, por lo que solo puede abrir y cerrar de una sola forma, ver figura 11.

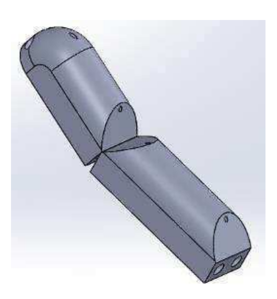


Figura 11. Dedo pulgar

Palma: La palma cuenta con orificios superiores por donde se canalizan los tendones y estos salen por la parte trasera de la mano, donde llevan un amarre y así se sujetan a la palma, por la parte frontal cuenta con orificios para canalizar los cables y así estos puedan conducirse hasta los servomotores. El diseño se muestra en la figura 12.



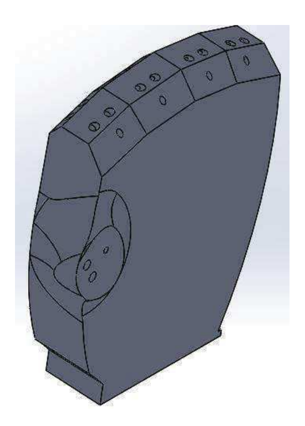


Figura 12. Diseño de palma.

Antebrazo: El antebrazo no contiene partes móviles, el diseño mostrado en la figura 13 es el que se contempló para que pueda albergar los servomotores que sirven para mover los dedos, por lo que en un extremo cuenta con dos barras las cuales tienen orificios en los que se sujetarán por medio de tornillos los servomotores. Para evitar que estas barras sufrieran de algún daño al momento del ensamble, se tomó en cuenta la medida de la perforación de los orificios de los servomotores para diseñar la cuerda por donde pasará el tornillo, así con esto evitar que surjan grietas u otro problema después de pasar por la impresión 3D.



Figura 13. Antebrazo albergando los servomotores utilizados para mover los dedos.

2.2 Módulo ensamblado.

El ensamble costa de 16 piezas impresas individualmente, el tiempo de impresión total fue de 19 horas, llevando el mayor tiempo el antebrazo. Para esto se utilizó la impresora MakerBot Replicator+ [12], y para todas las piezas impresas se utilizó como material PLA, dado que brinda una alta resistencia plástica en comparación con el ABS. El diseño ensamblado se muestra en la figura 14.

Las partes de las que se compone el ensamble costa en la siguiente tabla, en la que además se incluyeron los servomotores utilizados, así como la tornillería para sujetarlos al antebrazo, con lo cual se obtiene un total de 31 piezas que en total componen el prototipo. La tabla 2 muestra los componentes usados en el prototipo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



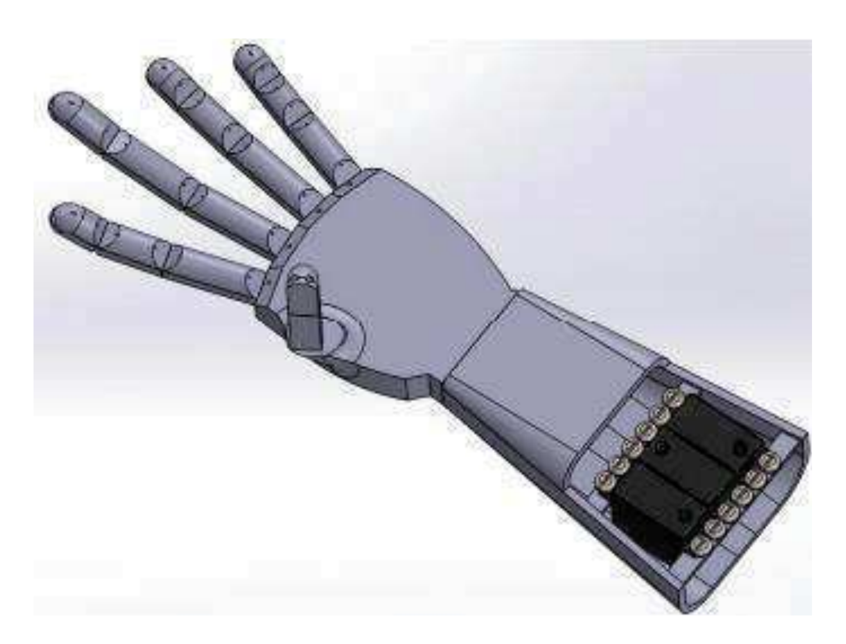


Figura 14. Diseño del módulo ensamblado.

Tabla 2. Partes del ensamble.

Numero de parte	Nombre de parte	Cantidad
1	Palma	1
2	Falange proximal	5
3	Falange media	4
4	Falange distal	5
5	Antebrazo	1
6	Servomotor	3
7	Tornillos 5 x 10	12
	Total	31

2.3 Análisis estático

Se utilizo el software SolidWorks para realizar el análisis de las partes que componen el prototipo planteado. El material aplicado para las piezas fue el polímero PLA, el cual tiene un límite elástico de 60 MPa y un módulo de elasticidad de 3.5 GPa. El análisis que a continuación se presenta fue realizado de manera separada a los componentes, pero tratando de mantener las especificaciones de sujeción.

Dedos

El análisis iniciara con el estudio en las falanges de los dedos, para esto en la figura 15 se muestra la distribución de estas, en color azul se muestra la falange proximal, continuando con la falange media en color verde y por último en color rojizo la falange distal.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



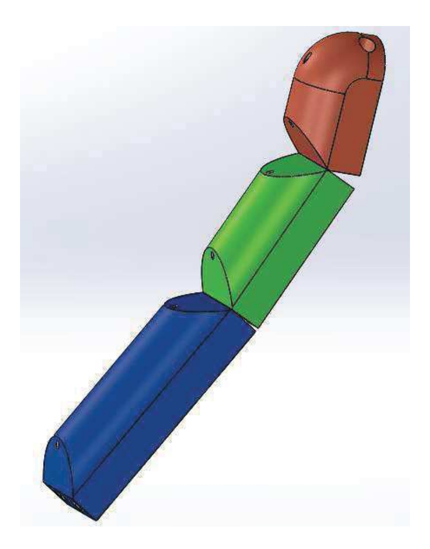


Figura 15. Distribución de falanges en dedo índice.

Falange proximal.

Para el análisis de esta parte, se utiliza como muestra la falange del dedo índice a la cual se aplicó una fuerza de 450 N, además de aplicar también una sujeción de geometría a la cara conjunta a la parte superior de la palma. En la figura 16, se muestra el valor máximo de tensión el cual alcanza un valor de 13.7 MPa, lo cual queda lejos del límite de tracción del PLA el cual es de 60 MPa.

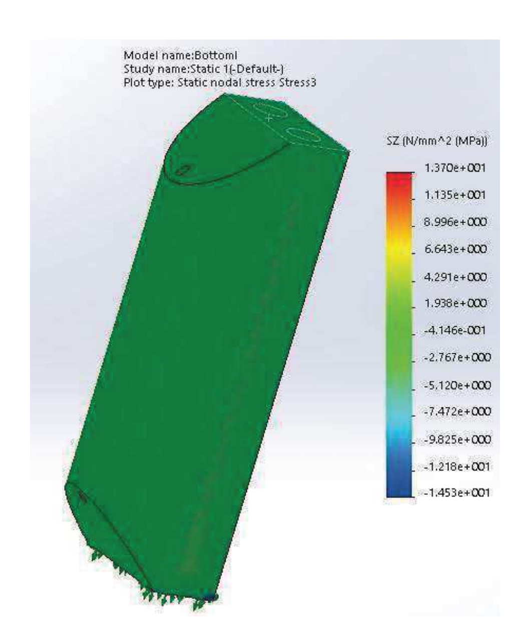


Figura 16. Análisis de tensiones.

En la figura 17, se muestra el análisis de deformación realizado a la falange proximal, donde arroja un resultado de 0.05 mm de desplazamiento, lo cual es considerado como un valor aceptable, ya que se puede seguir trabajando para las aplicaciones planteadas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



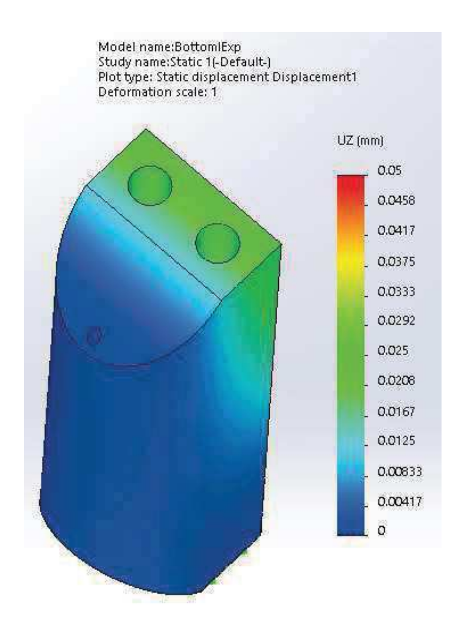


Figura 17. Análisis de deformaciones sufridas.

Falange media

A continuación, se presentan los resultados del análisis realizado a la falange media para la cual se aplicó una fuerza de 450 N, además de igual forma se aplicó las sujeciones conforme a la cara de la falange proximal, en la figura 18 se muestra el resultado máximo de tensión para el cual se obtuvo 2.126 MPa, y de igual forma se concluye que es aceptable dado que queda por mucho lejos del límite de tracción el cual es de 60 MPa.

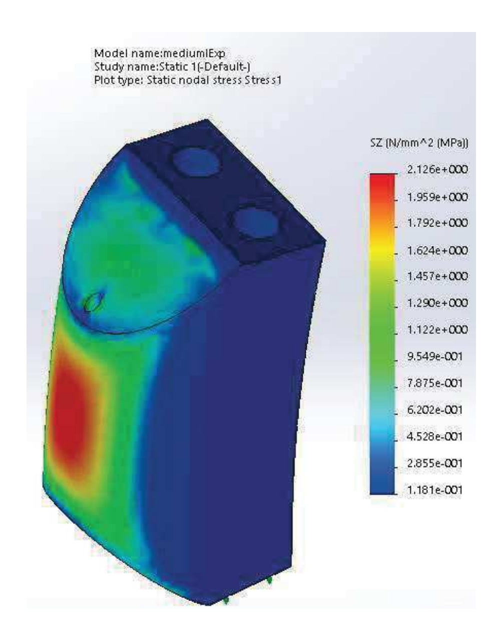


Figura 18. Análisis de tensiones en falange media.

La figura 19 muestra el análisis de desplazamiento, en donde se obtuvo como resultado un valor de 0.0676 mm lo cual puede ser considerado como despreciable de acuerdo con las dimensiones de la pieza.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



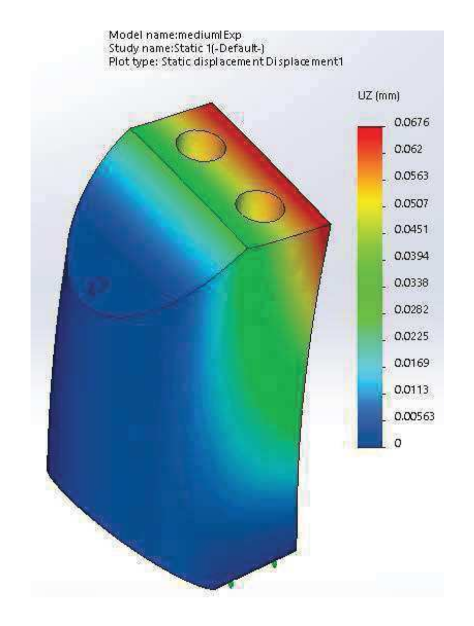


Figura 19. Análisis de desplazamiento de falange media.

Falange distal

A continuación, se presenta el análisis realizado a la falange distal, a la cual se aplicó una fuerza de 450N, al igual que las demás partes se aplicaron las sujeciones correspondientes, como se puede apreciar en la figura 20, el resultado máximo de tensión es de 20.37 MPa, siendo el valor mayor obtenido en referencia a las demás falanges, aun con esto el valor queda en un tercio del límite de tracción el cual es de 60 MPa.

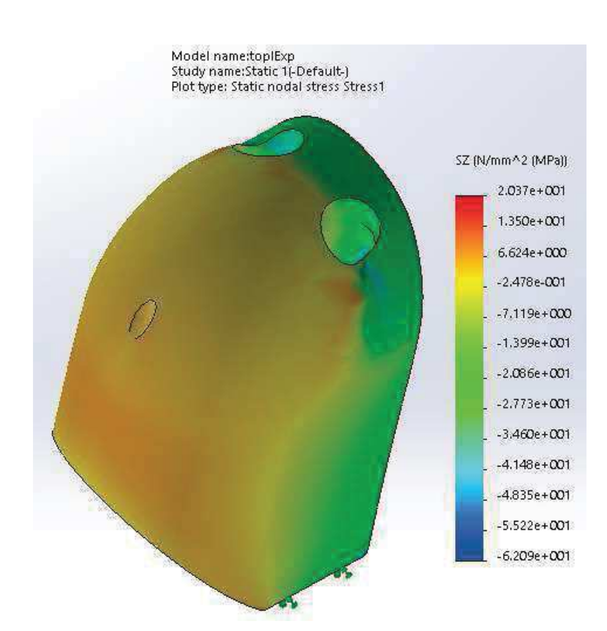


Figura 20. Análisis de tensiones en falange distal.

La figura 21 muestra los resultados obtenidos del análisis de desplazamiento para la falange distal, en donde se obtuvo un valor de 0.0457 mm que al igual que en los demás análisis el valor puede ser despreciable en cuanto a las dimensiones de la falange distal.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



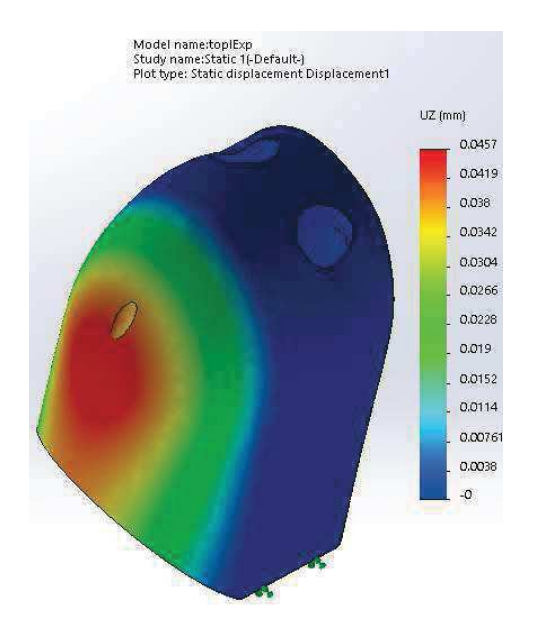


Figura 21. Análisis de desplazamiento de falange distal.

Palma

El análisis presentado a continuación en la figura 22 es el realizado a la palma del prototipo, de igual manera el material utilizado es el polímero PLA, en cuanto a los resultados corresponde, de manera general se considera que estos son aceptables, los valores que más se elevan es en el área de los orificios por donde pasan los tendones artificiales. El resultado mayor obtenido es de 17.76 MPa quedando por debajo del límite de tracción de material PLA.

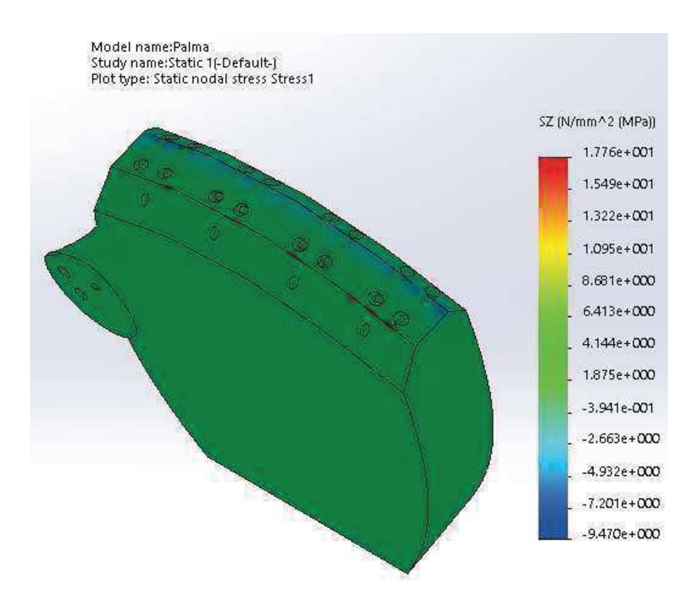


Figura 22. Análisis de tensiones en la palma.

La figura 23 muestra los resultados del análisis generado en la palma en cuanto a desplazamiento, el valor mayor que se obtuvo fue de 0.208 mm lo cual se considera como un resultado aceptable tomando en cuenta las dimensiones y características de la parte con mayor desplazamiento.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



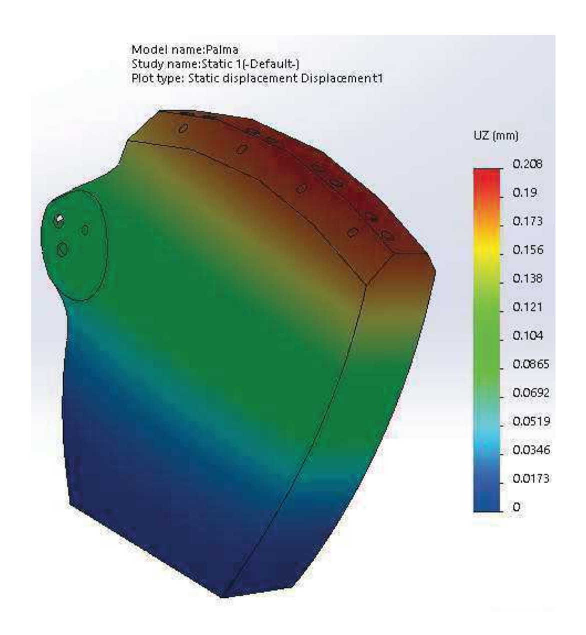


Figura 23. Análisis de desplazamiento en la palma.

2.4 Control electrónico

Cuando el usuario realiza un movimiento, presión o flexión, se genera una señal analógica proveniente del sensor mioeléctrico, esta señal pasa al controlador y por medio de un pulso de una señal modulada genera la acción de control para los servomotores, para así tensar los tendones y de esta manera los dedos realicen un movimiento rotacional con lo cual los dedos se curven. El esquema de trabajo propuesto se muestra en la figura 24.

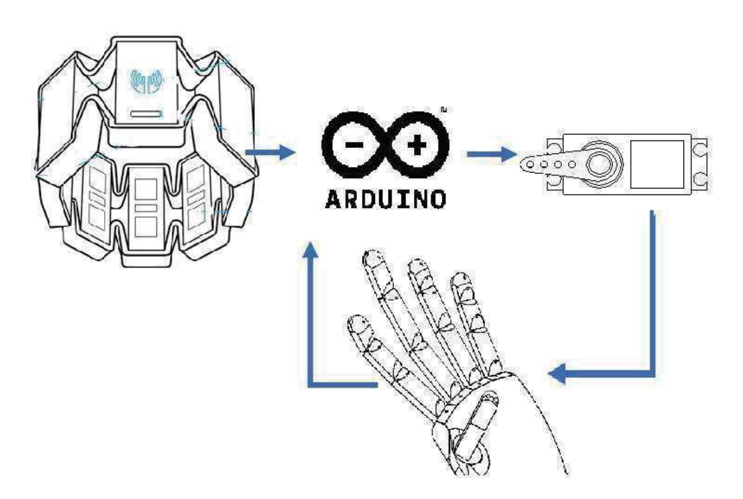


Figura 24. Esquema de control del sistema.

Se utilizo el sensor Myo ArmBand de la compañía Thalmic Labs, este sensor en forma de brazalete cuenta con 8 sensores que se ubican alrededor del bicep o antebrazo. Las señales que se captan de la activad muscular son muy pequeñas por lo que este sensor cuenta con la capacidad de amplificarlas y rectificar la onda [13].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El sensor se comunica por medio del dispositivo bluetooth a la computadora, posteriormente pasa los datos obtenidos conforme a la señal muscular del usuario a la tablilla Arduino, que mediante pulso moverá los servomotores y así los dedos tendrán movimientos rotacionales. La Myo ArmBand puede extraer datos electromiográficos a 200 Hz y es adaptable a un tamaño de brazo de 7.5 a 13 pulgadas de la circunferencia y tiene un peso de 93 gramos. Las ventajas de este sensor es que es de bajo costo y tiene la posibilidad de vincularse a diversos dispositivos.

Servomotores

En la presente propuesta se utilizó un total de 3 servomotores, el modelo seleccionado es MG996R ya que provee el torque y adaptabilidad referente al espacio para su ensamble, así como la precisión en movimientos angulares requerida. Las especificaciones de los servomotores usados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de los servomotores.

Especificaciones	Medidas
Peso	60 gramos
Dimensiones	40.7 x 19.7 x 42.9 mm
Voltaje	4.8 V a 7.2 V
Amperaje	500 mA – 900mA

El controlador propuesto se basa en un diseño en lazo abierto, por lo que se asume que la calibración de los sensores y actuadores es precisa. Las conexiones físicas están dadas por medio de cables tipo jumper, estos corren de los servomotores a la tarjeta Arduino, esto se muestra en la figura 25.

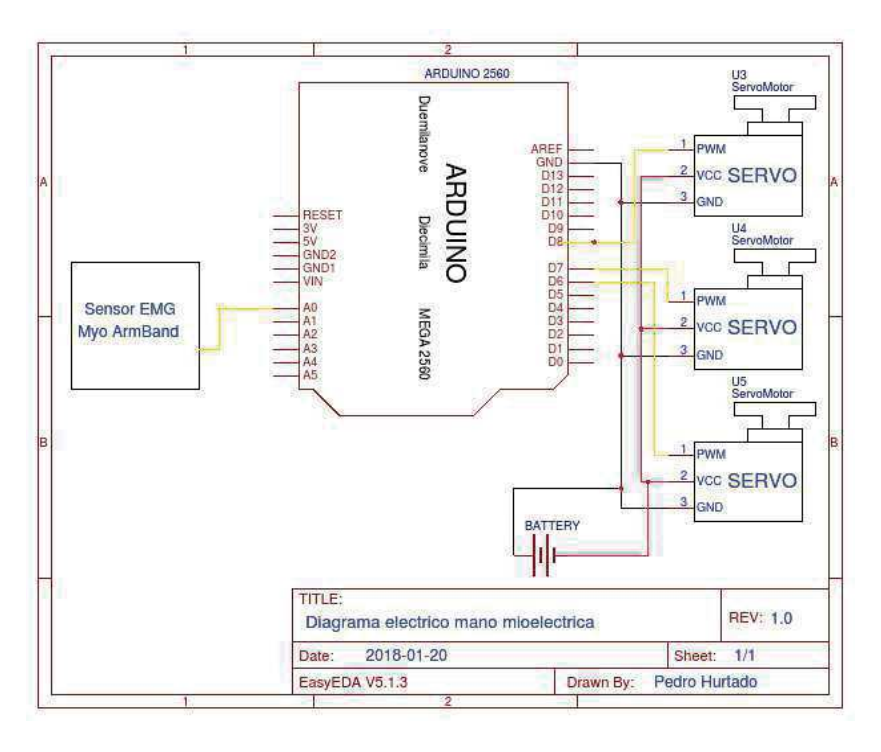


Figura 25. Circuito eléctrico.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

El prototipo una vez impreso y ensamblado cuenta con la capacidad de ser controlado por señales mioeléctricas detectadas con el sensor Myo ArmBand. El diseño cuenta con 16 piezas impresas individualmente en 3D con el apoyo de la maquina MakerBot Replicator+, el ensamble final se muestra en la figura 26.



Figura 26. Ensamble de prototipo físico

Con la intención de probar la validez del prototipo se efectuó un experimento en donde un usuario brinda la orden a la prótesis de abrir y cerrar la mano mediante las señales mioeléctricas, además de tomar un objeto con la prótesis. Los resultados se muestran en las figuras 27 y 28.

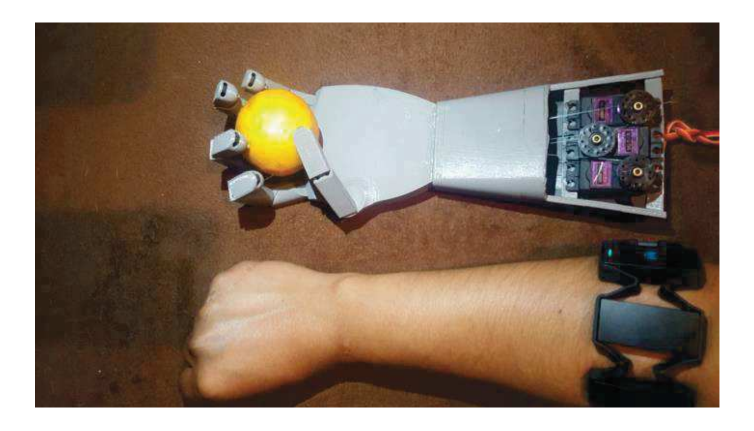


Figura 27. Usuario tomando un objeto.

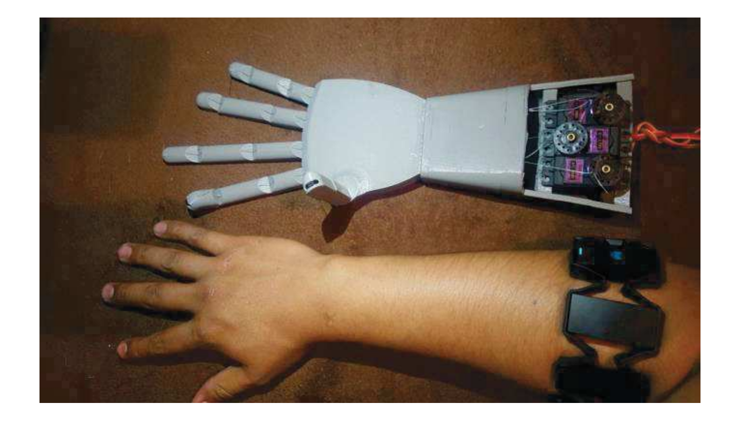




Figura 28. Usuario con dedos extendidos.

Dentro de las pruebas se determinó que los dedos abren y cierran de manera natural, a diferencia de otros prototipos disponibles en el mercado, este sistema cuenta con un retraso en su señal para abrir y cerrar los dedos debido a que se pierde tiempo en la etapa en la que el sensor mioeléctrico elimina el ruido que pudiera captar dentro de la recolección de las señales.

La limitante de fuerza en los dedos se encuentra principalmente en la impresión del componente, ya que el servomotor aporta 10 kgf/cm, sin embargo, si se aplicara una tensión superior que la que se adaptó al sistema podría destruir estas piezas al poder reventar los canales por los que pasa el tendón artificial. A pesar de esta limitante el diseño propuesto cuenta con la capacidad de abrir y cerrar la mano, así como poder sujetar diversos objetos.

El sensor cuenta con 8 sensores ubicados alrededor del antebrazo o bicep con los cuales se determina la actividad muscular que tiene el usuario, así toma muestras de señales cada 100 milisegundos, en la figura 29, se aprecia el comportamiento de los ocho sensores ubicados en el sensor al momento en el que el usuario tiene la mano abierta, lo que hace que los servomotores se mantengan en su posición inicial y así los dedos de la mano impresa se encuentran abiertos.

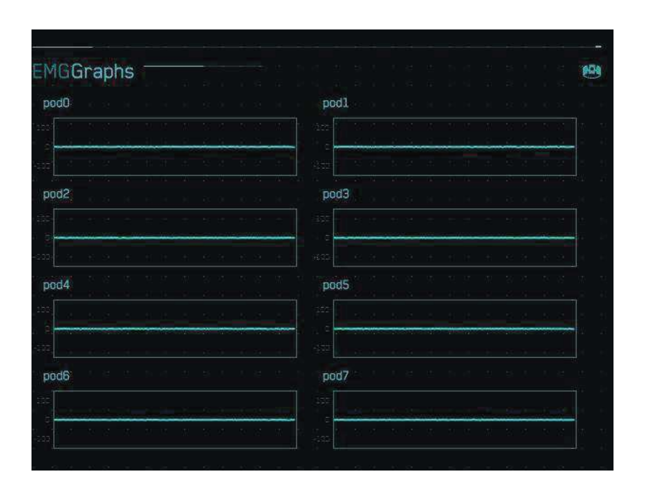


Figura 29. Señales obtenidas por el sensor con la mano abierta.

Los giroscopios y acelerómetros con los que cuenta el sensor generan un muestreo de la posición del sensor en el brazo, determinando así en cuales músculos se encuentra cada sensor, determinando si se encuentra en un musculo flexor o extensor. A la vez para determinar si el sensor de la compañía Thalmic Labs está censando el movimiento correcto se puede entrenar con los indicadores que se muestran en la figura 30, los cuales muestran el movimiento que se esta generando en nuestra prótesis de acuerdo con la lectura de los 8 sensores que se encuentran en el brazalete.

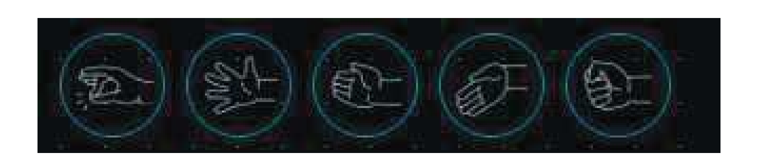


Figura 30. Indicadores de gestos realizados.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



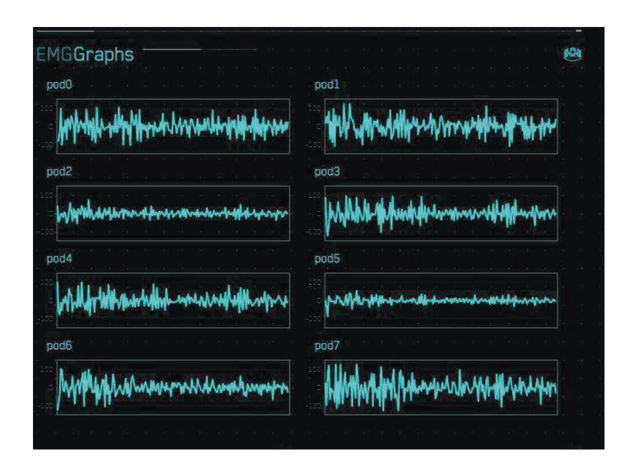


Figura 31. Señales obtenidas por el sensor con la mano cerrada.

En la figura 31 se aprecia las señales obtenidas cuando la mano se encuentra cerrada, posteriormente después de obtener las señales se filtra y amplifica para así enviar la señal a los servomotores y estos realicen un movimiento predeterminado de 180 grados. Para confirmar el movimiento realizado nos apoyamos de los indicadores de gestos, el cual se aprecia en la figura 32, en la cual se observa las señales del puño y los indicadores mostrando el gesto a seguir en la prótesis.



Figura 32. Señales tomadas del puño e indicadores mostrando la acción en prótesis.

La tabla 4 muestra el costo total del sistema elaborado el cual es de 115 dólares.

Tabla 4. Costos.

Descripción	Costo
420 gramos de PLA	40 USD
Sensor Myo ArmBand	50 USD
Microcontrolador	15 USD
3 servomotores	9 USD
Tendones artificiales	1 USD
Total	115 USD

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Conclusiones

El objetivo principal del proyecto fue diseñar y construir un prototipo de mano la cual fuera controlada por señales mioeléctricas, se determinó imprimir la prótesis en material PLA dado que ofrece una mejor resistencia plástica que el material ABS, el diseño elaborado fue por medio del software CAD SolidWorks. Los análisis estructurales realizados con el mismo software brindaron la confianza para la construcción, asegurando así poder evitar costos elevados por perdidas en la impresión del prototipo, las piezas impresas fueron totalmente funcionales para actividades básicas. El esquema de control utilizado es en lazo abierto, con la intención de minimizar los costos de producción y que el prototipo sea ligero. A esta conclusión se agrega que el objetivo principal del prototipo se cumple, tomando en cuenta el estudio cinemático obtenido, dejando como área de oportunidad el análisis dinámico en el que se determinen velocidades y posiciones de los servomotores, una de las áreas pendientes a mejorar es buscar una estrategia para compensar el retraso en la señal de control proveniente del sensor mioeléctrico, por parte de la fuerza de agarre o presión que maneja la prótesis se encuentra limitada por las características de operación de los servomotores. Además, el sistema se basaba solo al estudio mecatrónico dejando así de lado la adaptación a algún usuario, esto debido a falta de conocimientos médicos, pero con el estudio presentado se espera que esto pueda ser tomado para su implantación teniendo que diseñar un adaptador para el usuario final.

Los autores extienden su agradecimiento a la Secretaría de Educación Pública de México por financiar este trabajo a través de Acuerdo de investigación 511-6 / 17-7605.

Referencias

[1] Liu M. Xiong C. Xiong L. and Huang X. *“Biomechanical Characteristics of Hand Coordination in Grasping Activities of Daily Living”,* Research Article. 2016.
[2] Loaiza, J. and Arzola. N. *Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano*, 2011
[3] González J. *“Robótica y prótesis inteligentes”,* Revista Digital Universitaria, 1–15, 2004.
[4] Darío P. and Micera S.” *A consortium Project for enhanced control of powered artificial hands based on direct neural interfaces*”, Neural prosthesis workshop, 2002.
[5] E.P. “*Una nueva mano biónica imita a la humana en aspecto, rapidez y movimientos*”, El País, 2008.
[6] Brito J. Marlon X. Cusco D. and Calle J. “*Estudio del estado del arte de las prótesis de mano”*, Ingenius, 2013.
[7] Huitzil I. Pájaro J. Ramírez I. *“Test of a Myo ArmBand”*, Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, 2017.
[8] Spainer D. Pinto G. *“Creación de una plataforma tecnológica para la investigación y producción de prótesis de brazo y mano en la república argentina”, 2012.*
[9] *“Selecting a development approach”, Centers for Medicare & Medicaid Services, 2008.*
[10] Miyamoto O. “*Impresión 3D. Hágalo usted mismo*”, ¿Cómo ves? Vol. 203, 2015.
[11] http://www.inegi.org.mx/
[12] MakerBot Inc., www.makerbot.com, 2018
[13] Abduo M. and Galster M. “*Myo Gesture Control Armband for Medical applications*”, Ir Canterbury, 2015.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 11, pp.122-138.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de Herramienta Virtual Didáctica del Sistema Resorte – Masa - Amortiguador

Venegas Moreno Juan José, Bañuelos Amezcua Ulises y Rodríguez Morales Moises

Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula

Resumen

El estudio de las ciencias exactas de la ingeniería, con frecuencia queda solo en un trabajo teórico analítico, aún en nuestros días a pesar de contar con suficientes tecnologías. Es por ello, que en esta propuesta se plantea el diseño y desarrollo de una herramienta virtual con fines didácticos, implementada mediante el software LabVIEW, para realizar un estudio experimental que nos aproxime significativamente al entendimiento de la dinámica abstracta de un tipo de sistema mecánico. Es decir, se plantea el modelado y análisis del sistema mecánico de traslación compuesto por los elementos resorte, masa y amortiguador viscoso, mediante la función de transferencia, el espacio de estados y la relación con los sistemas dinámicos de segundo orden en cuanto a la respuesta ante una entrada (fuerza) constante, a partir de lo cual se diseña la forma de medir, analizar y comprobar el comportamiento de datos característicos de la respuesta (desplazamiento) completa del sistema, cuando variamos los coeficientes de dichos elementos mecánicos y la entrada (fuerza) del tipo escalón.

Palabras clave: Función de Transferencia, Ingeniería de Control, Ecuación Característica, Polos, Entrada escalón, Ley de Hooke, Periodo, Respuesta Dinámica, LabVIEW, Espacio de estados.

1. Introducción

En el mundo moderno la ingeniería de control se concibe como una disciplina cada vez más dominada por las técnicas de modelado, una práctica que requiere procesos como comprender el problema, abstraer, modelar y construir, así como evaluar los diseños antes de la fabricación física de un producto. Además, la mayoría de los sectores productivos exigen a los ingenieros habilidades especiales para su ejercicio profesional, como pensamiento lógico, resolución de problemas y capacidad de abstracción. Las personas se sienten atraídas por la ingeniería porque les gusta aplicar la ciencia y usar sus habilidades para resolver problemas. En contraste, de acuerdo con la revisión del estado del arte, la formación que se imparte en la mayoría de programas de ingeniería no orienta a los estudiantes en pro de alcanzar ese objetivo, de aquí que la recomendación sea estructurar y poner en marcha currículos que orienten al desarrollo de sus capacidades en lógica y abstracción, con la meta de lograr profesionales creativos en ingeniería y con las habilidades, destrezas, conocimientos y operaciones necesarias para resolver los problemas de la sociedad de este siglo [2].

Se dice que para estudiar y entender el porqué del comportamiento dinámico de los sistemas físicos, es necesario conocer las leyes que lo gobiernan. En el caso complejo de la ingeniería de control, la cual es base fundamental para el diseño y aplicación del control automático, existe un rezago significativo en el entendimiento de la teoría y mucho mayor en la práctica. Los motivos de dicha problemática son multifactoriales, de acuerdo con mi experiencia en el área de la ingeniería de control, el estudio de los sistemas dinámicos en la automatización y control para la formación de profesionales en el área, no es suficiente mediante el estricto manejo de la teoría como comúnmente se hace.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Un sistema dinámico es aquel cuyo modelo se obtiene mediante ecuaciones diferenciales. Ejemplo de estos es el sistema mecánico resorte-masa-amortiguador RMA. El cual ha sido ampliamente estudiado, es decir, podemos encontrar desarrollos en la bibliografía común [3] y [5], con un enfoque totalmente teórico en relación al modelado y estudio dinámico de sistemas de primer y segundo orden particularmente. Las figuras 1 y 2, corresponden a ejemplos de sistemas relacionados con nuestra herramienta didáctica RMA. Es mediante imágenes la forma de apoyo habitual en que se trata de transmitir al estudiante el conocimiento abstracto, que con frecuencia no alcanza el dominio teórico porque hace falta una forma de apoyo que lo acerque a la práctica interactiva experimental, que le ayude a interpretar la relación entre lo abstracto y lo real. Por ejemplo Pereira ISSN 0122-1701 [1], trabaja una propuesta de estudio alternativo del sistema resorte-masa-amortiguador mediante la analogía con un sistema electrónico, figura 3., lo cual es comprobable y representa un trabajo interesante, sin embargo, es un puente que extiende la teoría y dificulta la posibilidad de comprender el comportamiento dinámico de la respuesta del sistema mecánico, debido a que es una forma de estudio considerablemente indirecta.

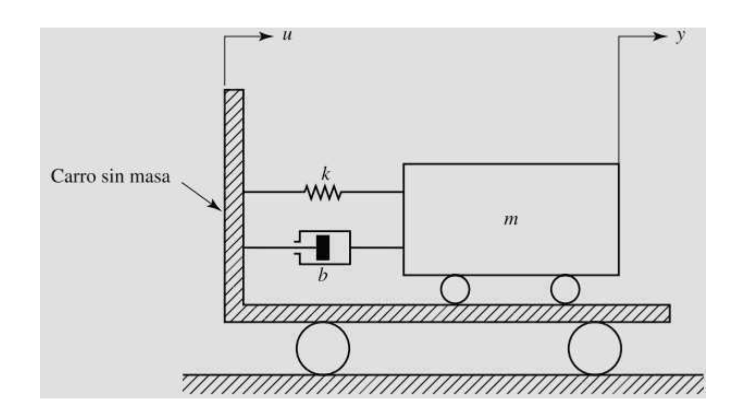


Figura 1. Sistema resorte-masa-amortiguador montado sobre un carro [3].

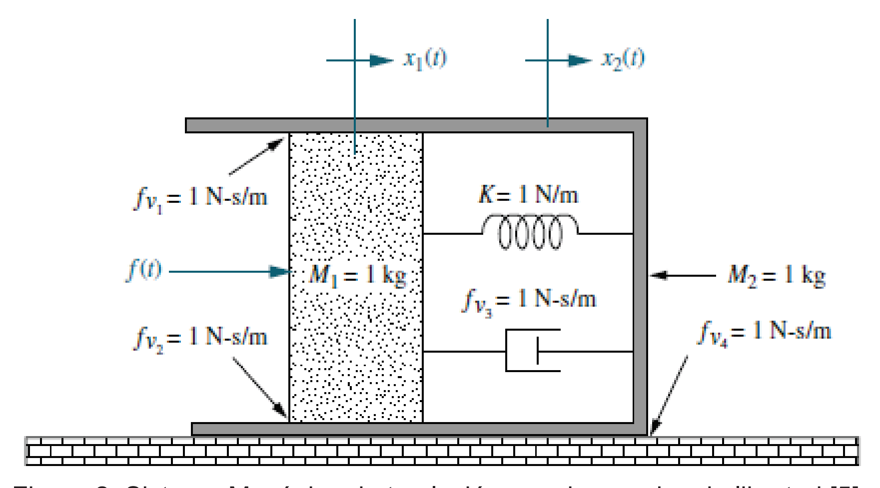


Figura 2. Sistema Mecánico de traslación con dos grados de libertad [5].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



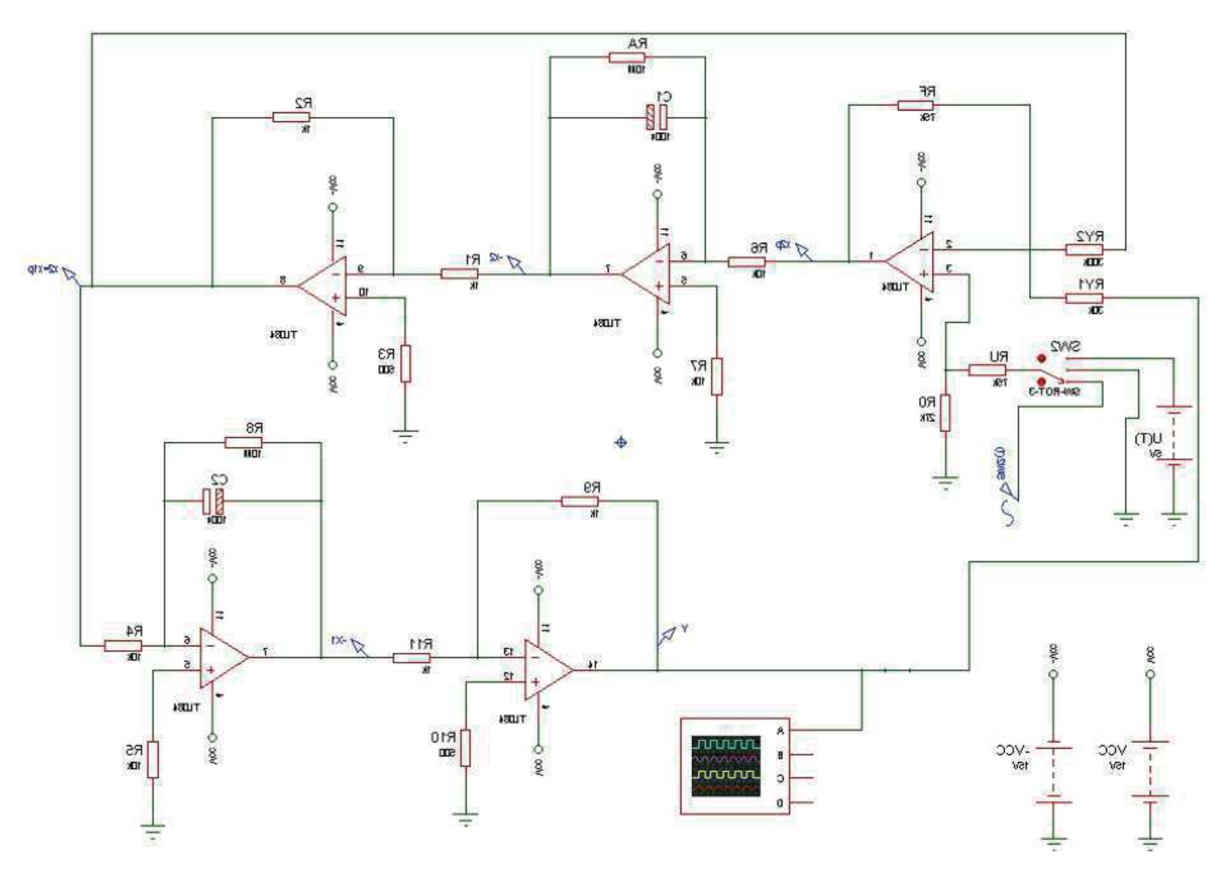


Figura 3. Sistema análogo resorte-masa-amortiguador electrónico. [1]

A diferencia de las propuestas meramente abstractas que podemos estudiar en [1], [3] y [5] referente al sistema mecánico de traslación RMA; el diseño de la herramienta didáctica virtual que proponemos, consistió en aplicar las leyes que gobiernan a los sistemas mecánicos, para obtener la función de transferencia y el modelo en espacio de estados correspondiente al desplazamiento como salida y a la fuerza como entrada, y con ello simular de forma práctica los tipos de respuesta en desplazamiento y velocidad cuando se aplica una fuerza de entrada de tipo escalón y al variar los parámetros de los elementos mecánicos en estudio como son la constante **k** del resorte, el coeficiente de fricción viscosa **b** del amortiguador y la masa **M** sujeta a los anteriores. Y desde aquí obtener las bases para calcular y definir las expresiones matemáticas que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema en cuestión, para programarlas mediante el software LabVIEW, y ofrecerle al estudiante una forma práctica de analizar y relacionar la teoría abstracta con el comportamiento real del sistema mecánico RMA propuesto.

Gracias a las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), son variados los beneficios y áreas de oportunidad existentes en el diseño de herramientas virtuales para el estudio experimental de sistemas dinámicos.

2. Marco Teórico

2.1 *Conceptos* [3]

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Es un modelo matemático, a partir del cociente salida sobre la entrada, en la variable compleja de Laplace, y bajo condiciones iniciales cero.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la teoría de control, este nos permite estudiar la respuesta dinámica de los sistemas. Se dice que para obtener la función de transferencia de un sistema determinado, es necesario conocer las leyes y principios que gobiernan a éste.

INGENIERÍA DE CONTROL Es un enfoque interdisciplinario para el control de sistemas y dispositivos. Combina áreas como eléctrica, electrónica, mecánica, química, ingeniería de procesos, teoría matemática entre otras.

ECUACIÓN CARACTERÍSTICA En la ingeniería de control, se entiende como ecuación característica o polinomio característico, al polinomio del denominador de la función de transferencia.

POLOS En la ingeniería de control, se definen los polos como los valores de la variable compleja de Laplace "S" para los cuales la función de transferencia tiende a infinito, o los valores de "S" para los cuales el polinomio característico se hace cero, es decir, las raíces de dicho polinomio.

ENTRADA ESCALÓN Función escalón de Heaviside. Tiene aplicaciones en ingeniería de control y procesamiento de señales, representando una señal que se enciende en un tiempo específico, y se queda encendida indefinidamente.

RESORTE-MASA-AMORTIGUADOR (RMA) Es la conexión o arreglo mecánico de una masa enganchada a un resorte y un amortiguador viscoso, el cual se estira o se comprime al recibir una fuerza externa como señal entrada.

LEY DE HOOKE La ley de elasticidad de Hooke o ley de Hooke, establece la relación entre el alargamiento o estiramiento longitudinal y la fuerza aplicada a partir de.

$$f_k(t) = K * x(t) \quad (1)$$

La elasticidad es la propiedad física en la que los objetos son capaces de cambiar de forma cuando actúa una fuerza de deformación sobre un objeto. El objeto tiene la capacidad de regresar a su forma original cuando cesa la deformación. Depende del tipo de material, los materiales pueden ser elásticos o inelásticos. Los materiales inelásticos no regresan a su forma natural.

PERIODO El tiempo que transcurre para realizar una oscilación completa se llama PERÍODO, se representa por T y se mide en segundos. La expresión que relaciona el cálculo de éste se deduce como:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

y se mostrará la deducción en el desarrollo matemático del trabajo realizado.

LAB-VIEW es el acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Es un lenguaje y, a la vez, un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones. Es un software de ingeniería en sistemas, diseñado específicamente para aplicaciones de pruebas, medidas y control con acceso rápido a Entradas/Salidas (E/S) de hardware y análisis de datos para convertir ideas en innovaciones. [4]

ESPACIO DE ESTADOS Método alterno de la teoría de control moderno, útil para representar la dinámica de sistemas físicos. [5]

2.2 *Respuesta dinámica de sistemas de segundo orden* [3]

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El primer paso para analizar un sistema de control es obtener un modelo matemático del mismo. Una vez obtenido tal modelo, existen varios métodos para el análisis del comportamiento del sistema.

2.2.1 Respuesta transitoria y respuesta en estado estacionario

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta en estado estacionario. La respuesta transitoria se refiere a la que va del estado inicial al estado final. Por respuesta en estado estacionario se entiende la manera como se comporta la salida del sistema conforme t tiende a infinito. Por tanto, la respuesta del sistema c(t) se puede escribir como

$$C(t) = C_{tr} + C_{ss}(t) \quad (3)$$

donde el primer término C_{tr} corresponde a la respuesta transitoria y el segundo término $C_{ss}(t)$ corresponde a la respuesta en estado estacionario.

2.2.2 Sistemas de segundo orden

El modelo en la ecuación (4), se denomina forma estándar del sistema de segundo orden

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\varepsilon\omega_n s+\omega_n^2} \quad (4)$$

El comportamiento dinámico del sistema de segundo orden se describe a continuación en términos de la variación en los parámetros ε y ω_n. Si $0 < \varepsilon < 1$, los polos son complejos conjugados y se encuentran en el semiplano izquierdo del plano complejo S, y el sistema se denomina subamortiguado debido a que presenta una respuesta transitoria oscilante. Si $\varepsilon = 0$, la respuesta transitoria presenta oscilación constante, es decir, sin amortiguamiento. Si $\varepsilon = 1$, el sistema se denomina críticamente amortiguado. Finalmente si $\varepsilon > 1$ se denomina sistema sobre amortiguado. La figura 4. muestra una familia de curvas de la respuesta $C(t)$ en función del factor de amortiguamiento ε.

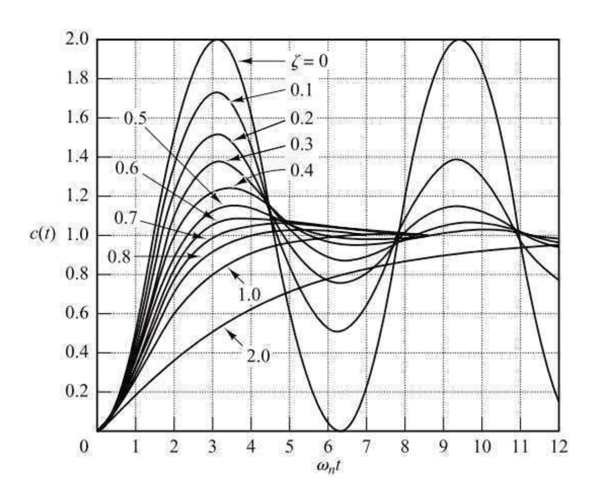


Figura 4. Curvas de respuesta a escalón unitario del sistema de segundo orden [5]

3. Cálculos y análisis de resultados.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



A partir de la aplicación de las teorías de ingeniería de control, específicamente los temas de función de transferencia, respuesta dinámica de sistemas de segundo orden y representación en espacio de estados, se desarrollaron los cálculos para obtener las expresiones de los datos característicos que se programarán en la herramienta didáctica del presente trabajo.

3.1 Función de transferencia

Se conoce como el modelo matemático que corresponde a la relación salida sobre la entrada, en la variable compleja de Laplace y bajo condiciones iniciales cero [3]. De forma particular en nuestro sistema mecánico correspondería a la siguiente relación.

$$\frac{desplazamiento}{fuerza} = \frac{salida}{entrada} = \frac{x(s)}{f(s)}$$

Partiendo del diagrama de circuito mecánico de traslación en la figura 5.

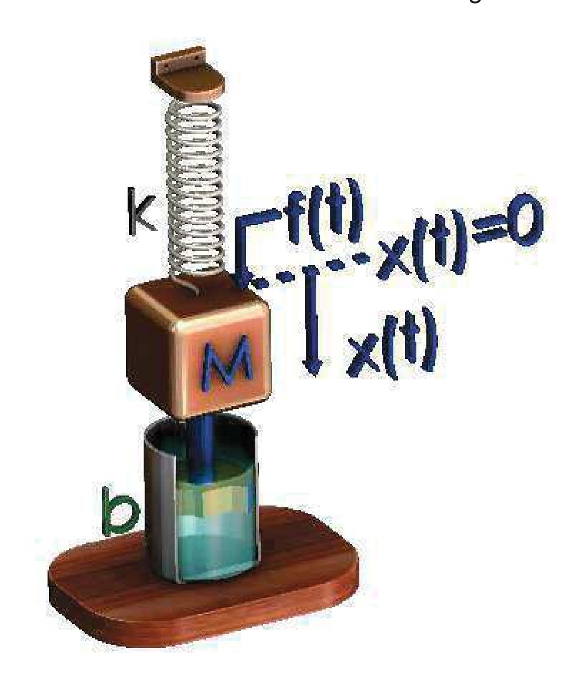


Figura 5. Sistema mecánico de traslación RMA.

Las expresiones que relacionan la fuerza-desplazamiento y fuerza- velocidad en los elementos mecánicos a analizar se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Resorte, Masa y Amortiguador viscoso en la Mecánica de traslación. [5]

COMPONENTE	FUERZA - VELOCIDAD	FUERZA - DESPLAZAMIENTO

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Spring ($x(t)$, $f(t)$, K)	$f(t) = K\int_0^t v(\tau)d\tau$	$f(t) = Kx(t)$
Viscous damper ($x(t)$, $f(t)$, f_v)	$f(t) = f_v v(t)$	$f(t) = f_v \frac{dx(t)}{dt}$
Mass ($x(t)$, M, $f(t)$)	$f(t) = M\frac{dv(t)}{dt}$	$f(t) = M\frac{d^2x(t)}{dt^2}$

Mediante el análisis de diagrama de cuerpo libre, en el cual se considera que las fuerzas que interactúan están en equilibrio, y representando cada derivada con un punto, se obtiene la ecuación diferencial (5) mediante la sumatoria algebraica de fuerzas igual a cero

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) - f(t) = 0 \tag{5}$$

Transformando a Laplace bajo condiciones iniciales cero

$$ms^2x(s) + bsx(s) + kx(s) - f(s) = 0 \tag{6}$$

Factorizando la salida x(s)

$$(ms^2 + bs + k)x(s) = f(s) \tag{7}$$

De aquí que la función de transferencia se define como

$$\frac{x(s)}{f(s)} = \frac{1}{(ms^2+bs+k)} \tag{8}$$

La cual se normaliza al multiplicar y dividir por $\frac{1}{m}$, obteniendo

$$\frac{x(s)}{f(s)} = \frac{1/m}{\left(s^2+\frac{b}{m}s+\frac{k}{m}\right)} \tag{9}$$

Siendo ésta la función de transferencia correspondiente a la salida **desplazamiento** $\boldsymbol{x(t)}$ respecto a la entrada **fuerza** $\boldsymbol{f(t)}$, y será el modelo que nos dé información sobre la dinámica característica del sistema RMA en estudio, bajo condiciones iniciales cero. Se puede identificar que se trata de un sistema de segundo orden, comparando con la forma general de un sistema de segundo orden normalizado, representado mediante la forma

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\varepsilon\omega_n s+\omega_n^2} \tag{10}$$

donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento, ω_n es la frecuencia natural no amortiguada. Una característica interesante en el estudio de la respuesta dinámica de sistemas de segundo orden es

ISBN: 978-607-9394-14-1.



que las formas de respuesta dinámica ante una entrada de tipo escalón, tienen relación directa con el valor de ξ [5].

Comparando la función de transferencia (9) obtenida para el sistema RMA, con el modelo general de segundo orden (10), se deducen a continuación las expresiones (17), (19), (22), (25) de interés para la programación y monitoreo de la dinámica del sistema mecánico virtual.

Primeramente igualamos los términos independientes del polinomio del denominador

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \tag{11}$$

es decir

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{12}$$

dado que

$$\omega_n = 2\pi f \tag{13}$$

y

$$f = \frac{1}{T} \tag{14}$$

entonces

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} \tag{15}$$

por lo cual

$$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{16}$$

de aquí, se despeja el periodo del ciclo de oscilación mecánica

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{17}$$

como la frecuencia periódica "f" está dada por

$$f = \frac{1}{T} \tag{18}$$

se calcula

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{19}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para calcular el valor final del desplazamiento o salida $x(t)$, aplicamos el teorema del valor final que se define con la expresión

$$V_f = \lim[_{s\to 0}\, s * G(s) * f(s)] \tag{20}$$

donde $G(s)$ representa la función de transferencia del sistema, y $f(s)$ la entrada o fuerza aplicada. Al sustituir el modelo (9) del sistema RMA y la entrada escalón de magnitud A, obtenemos la expresión de valor final

$$V_f = \lim_{s\to 0}\left[s * \frac{1/m}{\left(s^2+\frac{b}{m}s+\frac{k}{m}\right)} * \frac{A}{s}\right] \tag{21}$$

evaluando el límite se obtiene

$$V_f = \frac{A}{k} \tag{22}$$

Para calcular el coeficiente de amortiguamiento “ξ”, igualamos de forma correspondiente los coeficientes de S en los modelos (9) RMA y (10) general

$$2\varepsilon w_n = \frac{b}{m} \tag{23}$$

$$2\varepsilon\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{b}{m} \tag{24}$$

$$\varepsilon = \frac{b}{2\sqrt{km}} \tag{25}$$

3.2 Modelado en el espacio de estados [5]

Para programar la respuesta dinámica del sistema ante una excitación de entrada se eligió la representación en espacio de estados, es decir, un sistema lineal e invariante con el tiempo se describe mediante una ecuación de estado y una ecuación de salida como:

$$\dot{X} = Ax(t) + Bu(t) \quad -----> \quad Ecuación\ de\ estado$$

$$Y = Cx(t) + Du(t) \quad -----> \quad Ecuación\ de\ salida$$

donde **X** es el vector de estado, **u** es la entrada e **Y** es la salida.

3.2.1 Modelado en espacio de estados del sistema mecánico de traslación MAR

Utilizando la ecuación diferencial lineal (5)

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) - f(t) = 0$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



primeramente etiquetamos la conversión $u(t) = f(t)$ y $x(t) = y(t)$ y reescribimos la ecuación diferencial como

$$m\ddot{y}(t) + b\dot{y}(t) + ky(t) - f(t) = 0 \qquad (26)$$

por lo cual se define

$$x_1 = y$$

$$x_2 = \dot{y}$$

entonces, se escribe la ecuación diferencial lineal (26) como

$$\dot{x_1} = x_2$$
$$\dot{x_2} = -\frac{k}{m}x_1 - \frac{b}{m}x_2$$

Obteniendo la ecuación de estado $\dot{X} = Ax + Bu$

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} f \qquad (27)$$

y la ecuación de salida $y = Cx$ se obtiene mediante

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \qquad (28)$$

lo cual corresponde a la representación matricial (espacio de estados) de nuestro sistema RMA a programar.

4. Programación

Para el desarrollo de esta herramienta virtual del sistema dinámico Masa-Resorte-Amortiguador, se utilizó el programa de LabVIEW versión 2016 de 32 bits con su módulo de Control Design & Simulation de 32 bits, ejecutándose en modo de evaluación, cuando LabVIEW se utiliza en modo de evaluación se activa la edición profesional (Professional Development System) pero presenta dos limitantes: una de ellas es que solo funciona durante 7 días y la otra, que todo VI creado muestra una marca de agua con la leyenda “Evaluation Software”, visible tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques. El módulo de *Control Desing and Simulation*, contiene herramientas que facilitan la simulación de sistemas dinámicos, y puede usarse con teorías de control de enfoque clásico como de espacio de estados. Se desarrolló la estructura del programa en base a las funciones (17), (19), (22), (25), (27) y (28) obtenidas para cada variable de interés. Es decir, para programar la planta (sistema mecánico de traslación) se contempló el modelo en espacio de estados (27) y (28), lo que nos ofrece la posibilidad de monitorear y estudiar la respuesta completa en el tiempo.

Para la identificación de parámetros característicos en la respuesta, se programó la ecuación (17) para medir el periodo T, la ecuación (19) para medir la frecuencia “f”, la ecuación (25) para medir la constante de amortiguamiento ε, y la ecuación (22) para medir el valor en estado estacionario o valor final V_f.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



También se utilizaron bloques o instrumentos virtuales para generar dinámicamente la función de transferencia al igual que la representación en espacio de estados conforme a los cambios paramétricos seleccionados. Logrando un laboratorio experimental, interactivo y visual, a través de una Interfaz amigable. La figura 6 muestra el código estructurado en LabVIEW, del algoritmo diseñado.

La interfaz virtual nos permite monitorear las variables de interés, por medio de instrumentos de monitoreo, cuando variamos los parámetros (k, m, b y f) de los elementos mecánicos, y la amplitud de la entrada escalón, para lo cual se utilizan controles e indicadores independientes. También se programaron bloques de función que muestran la respuesta de desplazamiento $x(t)$ y velocidad $\frac{dx(t)}{dt}$, a través de gráficas independientes.

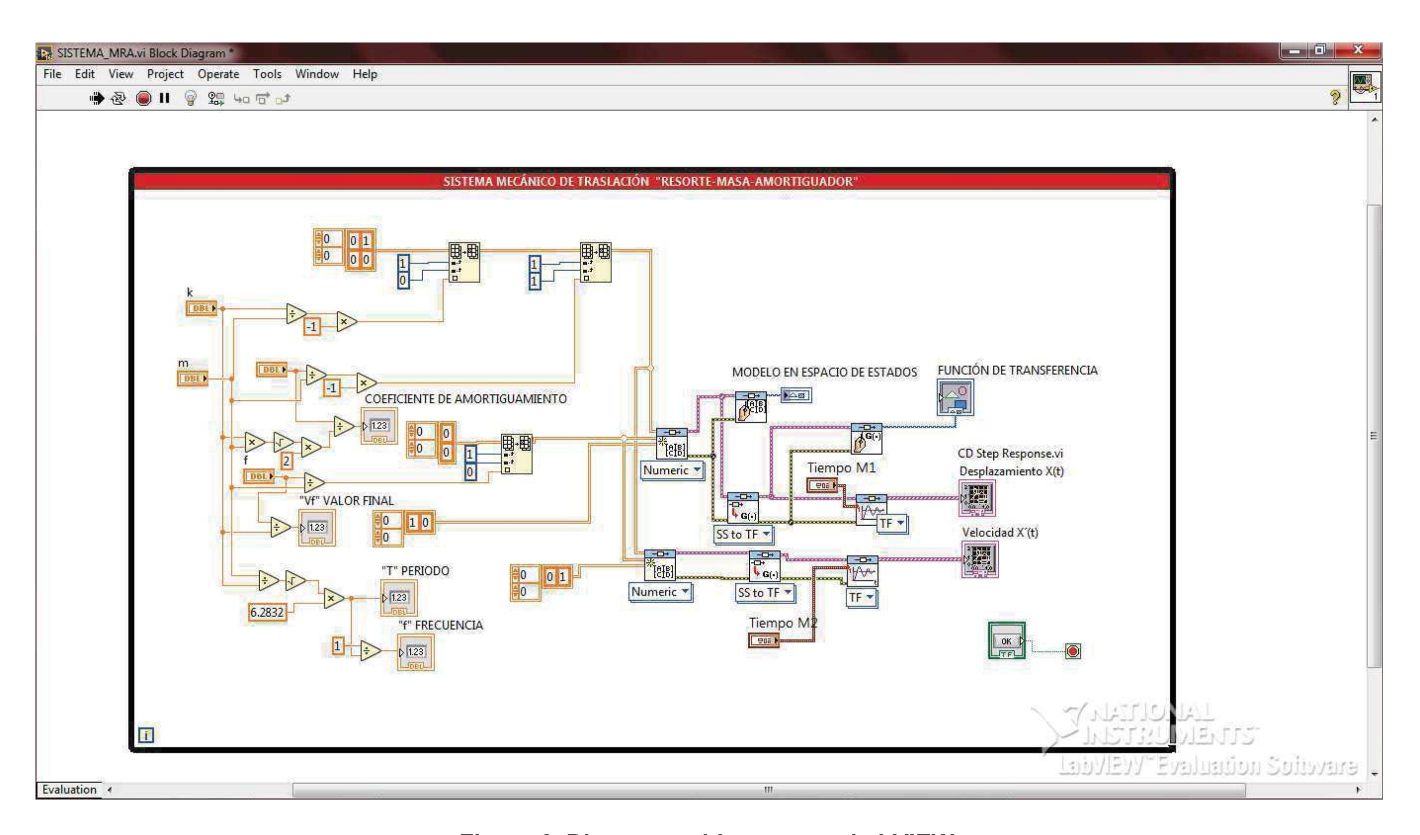


Figura 6. Diagrama a bloques con LabVIEW.

La metodología utilizada para la programación y caracterización del sistema RMA se describe en la Figura 7. Consiste en seis pasos generales aplicados para obtener la respuesta al desplazamiento y velocidad de la masa. Cada paso, se desarrolló mediante el uso de funciones básicas de LabVIEW y herramientas incluidas en la librería del módulo de *Control Desing and Simulation*.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



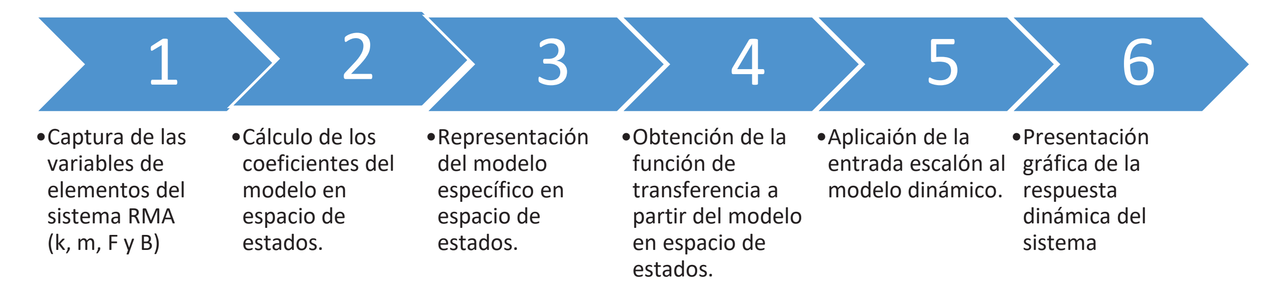


Figura 7. Metodología de programación del sistema mecánico de traslación RMA.

Paso1: Los valores ingresados por el usuario mediante los controles incluidos en el panel frontal, se asignan a las variables k, m, f y b respectivamente.

Paso2: Una vez que se capturan los valores de las variables k, m, f y b, definidas por el usuario del sistema, se realiza el cálculo de los coeficientes y la construcción de la matriz A del modelo en espacio de estados definido en la ecuación (27), por el diagrama a bloques de la figura 8.

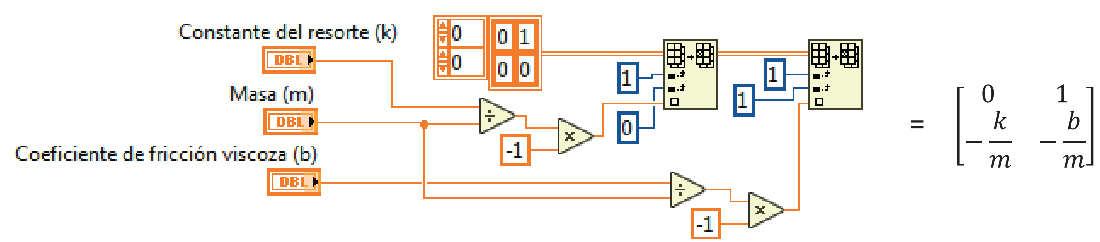


Figura 8. Código en LabVIEW para la construcción de la matriz A

A partir de un vector de 2x1 inicializado con coeficientes 0, se sustituye el valor del coeficiente de la fila 1 columna 0 por el valor resultante del cociente de f/m calculado a partir de la selección de los valores de las variables del sistema RMA ejecutado por el diagrama a bloques de la Figura 9.

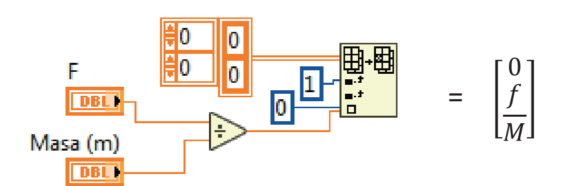


Figura 9. Código en LabVIEW para la construcción del vector B.

Para el vector C de la ecuación (28) de salida, del modelo en espacio de estados, se crea una matriz con una dimensión de 1x2 constantes con los valores mostrados en la imagen a de la Figura 10 a) para obtener la respuesta para el desplazamiento de la masa, en caso que se quisiera obtener el modelo del sistema para la velocidad se utilizaría la matriz constante con los valores mostrados en la figura 10 b).

a) 1 0

b) 0 1

$$= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Figura 10. Código en LabVIEW para la selección de la respuesta.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 11, pp.122-138.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una vez que se definen y se crean las matrices necesarias, se utiliza el VI "*CD Construct State-Space Model*" para crear la representación del modelo específico en espacio de estados correspondiente a los valores seleccionados en las variables RMA, agregando como parametros de entrada al VI las 3 matrices (A, B y C) creadas, como muestra el codigo de la Figura 11.

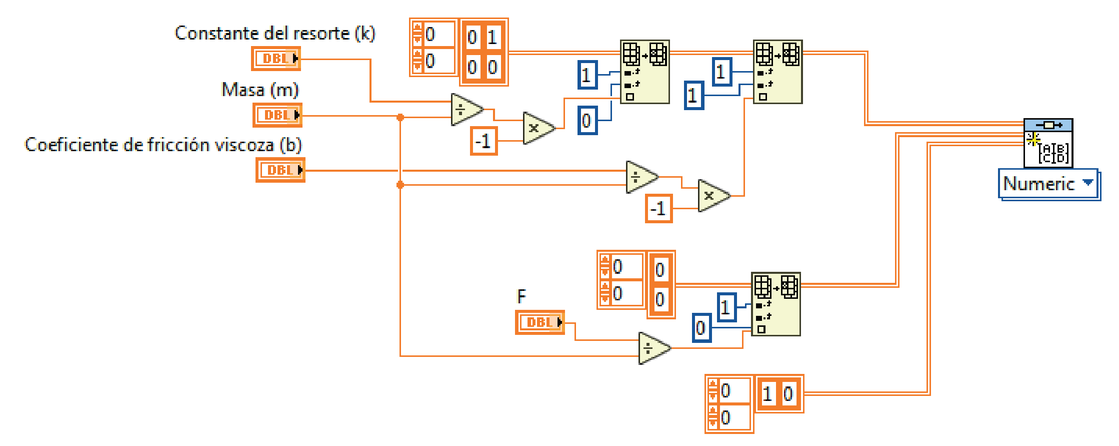


Figura 11. Código del modelo en espacio de estados.

Paso 3: Ahora que se ha construido la representación del modelo en espacio de estados a partir de los valores ingresados, se construirá una funcion de transferencia a partir del modelo en espacio de estado utilizando el VI "*Convert to Transfer Function Model*", a un tiempo se ejecuta el VI "*CD Draw State-Space Equation*" para visualizar en el panel frontal el Modelo del sistema en espacio de estados, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 12.

$$dx/dt = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.75 & -0.25 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.75 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u(t)$$

⇨ SS to TF ⇨

$$\frac{0.75}{s^2 + 0.25s + 0.75}$$

Figura 12. E/S herramienta *Convert to Transfer Function Model.vi*

Paso 4: Una vez que se obtiene la función de transferencia del modelo, esta se visualizará en el panel frotal utilizando el VI "*CD Draw Transfer Function Equation*" para generar la ecuacion correspndiente y presentarla en el indicador de ecuaciones, tal y como se muetra en la Figura 13.

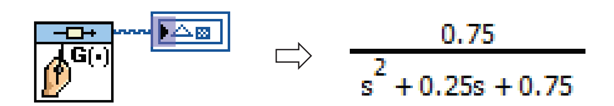


Figura 13. Visualización de la FT del modelo

Paso 5 y 6: finalmente, se consideran los valores introducidos en los controles del Intervalo de tiempo para la evaluación del modelo dinámico, aplicando la entrada escalón a la funcion de tranferencia con VI "CD Step Response", y generar un conjunto de valores, los cuales se visualizan en un indicador grafico XY como se muestra en la Figura 14.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



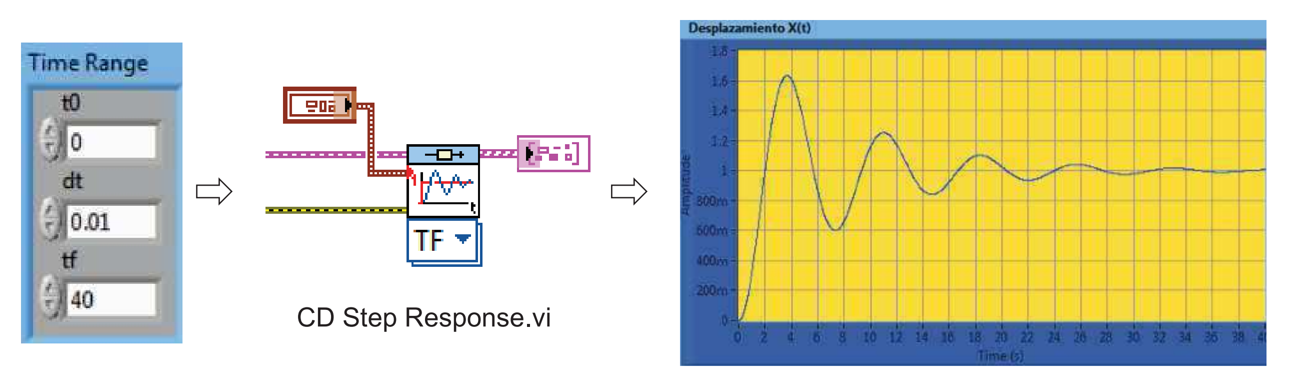


Figura 14. Visualización gráfica de la respuesta del sistema a una estrada escalón

La figura 15 muestra la interfaz hombre maquina (HMI), diseñada para el estudio dinámico del sistema mecánico de traslación RMA.

Figura 15. Interfaz hombre máquina RMA.

La interface se diseñó para que el usuario que interactúa con esta herramienta, pueda experimentar con el sistema RMA analizando su respuesta, por medio de la modificación de los valores de las variables que lo integran como son: la constante de amortiguamiento del resorte (k), la masa (m), la fuerza que se aplica al sistema (f) y la constante de amortiguamiento (b), por lo cual, estas variables pueden ser modificadas desde el panel frontal mediante 4 controles nombrados k, m, f y b respectivamente, como lo muestra la Figura 16.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



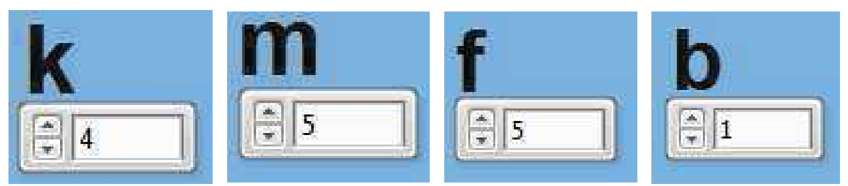


Figura 16. Controles para las variables RMA.

Cada vez que se modifiquen estas variables desde el panel frontal, se construye un nuevo modelo representativo del sistema en espacio de estados y se define la función de transferencia característica del sistema dinámico particular, estas ecuaciones resultantes se muestran en dos indicadores incluidos en el panel frontal, nombrados como "*Modelo en espacio de estados*" y "*Función de transferencia*" respectivamente, como se muestra en la Figura 17. Ésta interface también incluye cuatro indicadores numéricos que caracterizan la respuesta dinámica, como son el periodo "T", la frecuencia de oscilación "f", el valor final del desplazamiento "Vf" y el coeficiente de amortiguamiento "ξ".

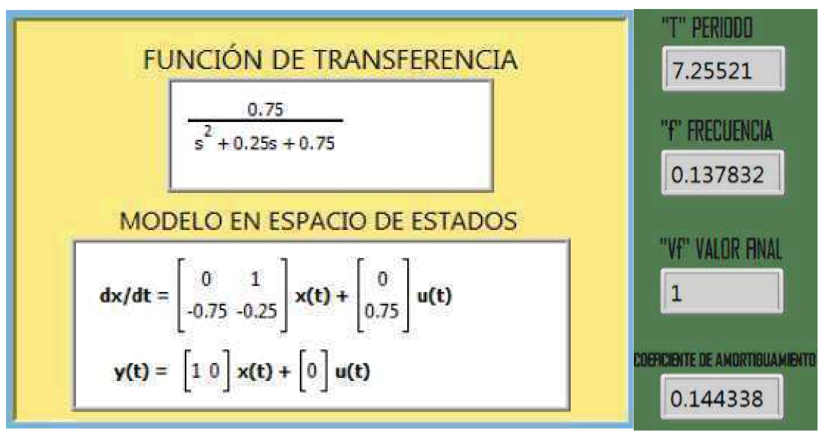


Figura 17. Presentación de resultados numéricos.

En el panel frontal además, se encuentran dos grupos de controles (Clusters) nombrados como "*Tiempo M1*" y "*Tiempo M2*" en donde se define el intervalo de tiempo en que se evaluará la respuesta del modelo ante la fuerza de entrada de tipo escalón, para facilitar la compresión y evaluación de los resultados obtenidos, en el panel frontal se agregaron dos indicadores gráficos que muestran el desplazamiento y la velocidad de la masa ante los parámetros seleccionados por el usuario, como se muestra en la Figura 18. El rango de tiempo que se graficará tanto en desplazamiento como en velocidad se define en cada uno de los grupos de controles de tiempo, seleccionando el tiempo inicial en que se evaluará el sistema a través del control "*t0*", con incrementos de tiempo definido por el control "*dt*" y hasta el tiempo final "*tf*".

ISBN: 978-607-9394-14-1.



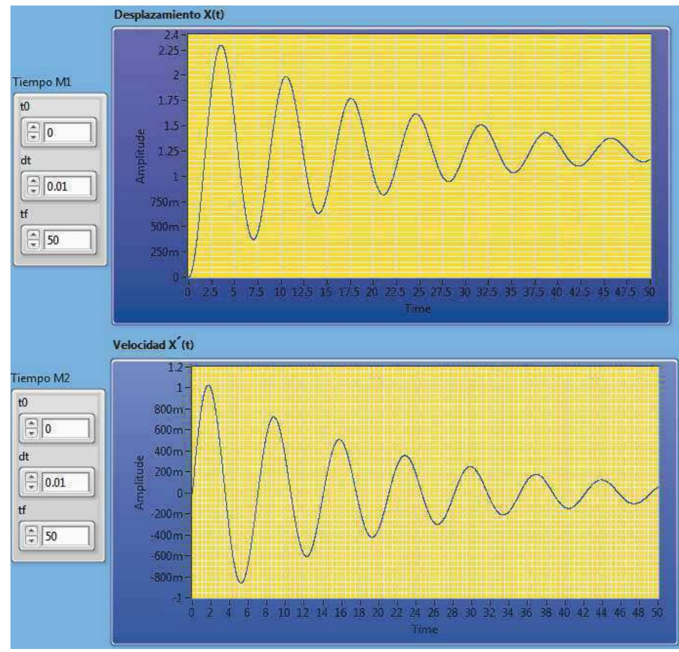


Figura 18. Representación gráfica de la respuesta dinámica del sistema.

5. Analisis de datos

A partir de las relaciones encontradas para el periodo “T”, la frecuencia "ω_n", la frecuencia “f”, el factor de amortiguamiento "ε" y el valor final V_f , es posible identificar que el periodo “T” solo depende de la masa “m” y la constante “K” del resorte, siendo directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a la constante “K” del resorte; al contrario que ocurre con la frecuencia “f” al ser el inverso del periodo “T”. Se cuenta con la identificación del valor final V_f de la respuesta del sistema cuando se aplica una entrada escalón de magnitud “A”, y es importante ver que solo es función de la amplitud “A” del escalón y de la constante “K” del resorte, siendo directamente proporcional a la magnitud “A” e inversamente proporcional a la constante del resorte. El coeficiente de amortiguamiento "ε", es función del coeficiente de fricción viscosa “b”, la constante “K” del resorte y de la masa “m”; y es directamente proporcional a “b” e inversamente proporcional al producto “km”.

6. Conclusiones

Aplicando las teorías y cálculos de la ingeniería de control, fue posible identificar expresiones para caracterizar la respuestas de desplazamiento y velocidad de la masa al aplicar una fuerza de entrada, y medir algunas de las variables de interés común como el periodo “T”, la frecuencia natural no amortiguada "ω_n", la frecuencia periódica “f” y el factor de amortiguamiento $\boldsymbol{\varepsilon}$**,** en función de los cambios paramétricos en la constante “K” del resorte, el coeficiente de fricción viscosa “b” del amortiguador y la masa “m”. Está propuesta interactiva virtual ofrece un acercamiento inmediato con la práctica experimental, necesaria para consolidar el dominio de aprendizaje general del estudio de la respuesta dinámica en el sistema mecánico planteado, ante la variación de valores de los elementos mecánicos y la magnitud de la señal de entrada escalón.

La presente herramienta virtual ha representado una propuesta didáctica significativamente reconocida por estudiantes y docentes dedicados al estudio de la física aplicada e ingeniería de control, particularmente en el tema de modelado y respuesta dinámica de sistemas de segundo orden,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



ya que le permite al estudiante una comprensión efectiva del caso en estudio, y facilita al docente el abordar y dar mejor sentido a la continuidad de los temas relacionados.

Referencias

[1] J. C. E. Q. W. Ardila, Simulación de un sistema masa resorte amortiguador con un circuito electrónico., Pereira. Colombia: Scientia Et. Technica XV, 2009.

[2] S. M. Edgar y J. A. Polo, Logic and Abstraction in Engineering Education: A Necessary Relationship, 2013.

[3] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, Madrid: PEARSON, 2010.

[4] J. S. J.R. Lajara, LabView Entorno Gráfico de Programación, México: Alfaomega, 2011.

[5] N. Nise, Control Systems Engineering, California: WILEY, 2011.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 12, pp.139-146.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sistema Spinner Magnético de 3 Brazos

Núñez Gaytán Alejandro[1], Cano Lara Miroslava[1], Martínez Rodríguez Alberto[1], Tapia Tinoco Guillermo[2] y Carrera Rodríguez Marcelino[3]

[1] Ing. Mecatrónica. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Carr. Irapuato-Silao Km 12.5, Col. El Copal. C.P. 3682. Irapuato, Gto.
[2] Ing. Electromecánica. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Carr. Irapuato-Silao Km 12.5, Col. El Copal. C.P. 3682. Irapuato, Gto.
[3] Depto. Formación Profesional Genérica. Instituto Politécnico Nacional. Av. Mineral Valenciana 200, Fracc. Industrial. Puerto Interior, C.P. 36275, Silao, Gto.

Resumen

Se presenta un sistema de spinner magnético de 3 brazos. El modelado y manufactura en SolidWorks fue empleado para la obtención de la estructura del spinner. El sistema emplea componentes electrónicos y magnéticos necesarios para estudiar las revoluciones y el tipo de señal en cada bobina. El sistema spinner está basado en un triángulo equilátero para la ubicación de cada brazo de su estructura el cual le proporcionará la estabilidad al momento de su cinemática rotacional. El control del giro está en función de los imanes y electroimanes empleados, los cuales trabajaron alrededor de 36000 Gauss. El resultado del sistema presenta movimientos constantes y controlados de 450-500 rpm, los cuales fueron controlados con un sensor Hall.

1. Introducción

El ser humano siempre busca nuevas técnicas o instrumentos con los cuales pueda entretener a los consumidores interesados en la electrónica. Uno de ellos es el spinner, un juguete del cual se tiene una patente desde 1993 [1]. En esos años, el spinner, aunque no fue un producto que tuvo mucha fama en la actualidad se ha puesto de moda siendo uno de los productos más vendidos en el mundo. Los spinner son juguetes que giran sobre su propio eje de manera rápida o lenta. Este movimiento giratorio es debido a una fuerza externa que se le aplica en alguna zona del spinner ya que a mayor fuerza mayor velocidad y viceversa. De esta manera la fuerza necesaria para su movimiento se aplica en los extremos o brazos según la configuración del spinner. La fuerza será externa a él para que lo empuje y genere el giro en su propio eje. Existen diversos tipos de fuerzas con las que se pueden generar estos movimientos, esto puede ser desde una fuerza mecánica, eólica o magnética. En particular, la fuerza magnética la podemos encontrar en fenómenos de atracción y repulsión empleando imanes y electroimanes los cuales ayudaran a obtener dicho fenómeno [2].

Los spinners están hechos de materiales como plástico, metal o madera y existe una gran variedad de modelos, formas y geometrías, aunque comúnmente se encuentran de 1 brazo hasta 5 brazos o incluso totalmente circulares (Ver Figura 1).



Figura 1. Configuraciones básicas de un spinner.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Un spinner de 3 brazos puede generar un giro prolongado dependiente del movimiento angular y de su momento de la inercia. La configuración está basada en un triángulo equilátero, donde en cada vértice se encuentra un brazo del spinner. El centroide o baricentro del triángulo es el punto donde se localiza el rodamiento necesario para generar el movimiento del spinner (Ver figura 2). Ciertos tipos de spinner para descartar la presencia de fricción que límite su movimiento utilizan un rodamiento tipo balero el cual se monta en el centro. Al aplicar una fuerza externa en algún brazo de su configuración, el spinner tiende a generar un movimiento en el sentido que se aplicó dicha fuerza, mostrando una cierta velocidad [3].

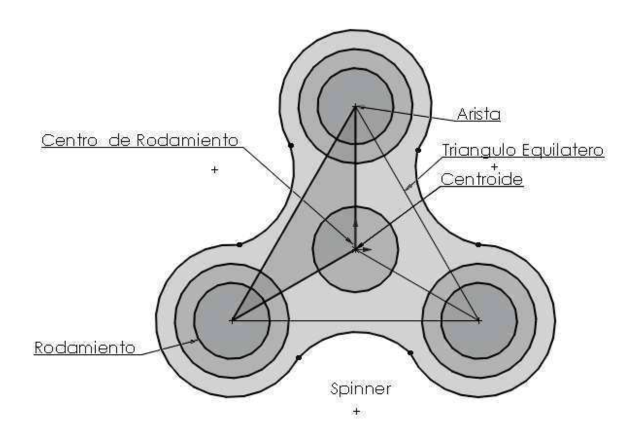


Figura 2. Similitud de spinner de 3 brazos con un triángulo equilátero

Existen diferentes formas de aplicar la fuerza a un spinner ya sea de manera mecánica o magnética. En particular, la fuerza magnética necesita emplear imanes y bobinas. Los imanes como bien se sabe se componen de dos polaridades norte y sur, donde generan fenómenos de atracción y repulsión. Existen diversos tipos de materiales con los que se fabrican imanes como acero al Carbono, Alnico, Ferrita, Cobalto y Neodimio-Hierro-Boro [4]. Debido a la fuerza magnética que se ejerce cuando dos imanes de la misma polaridad se unen, se puede emplear para jalar y empujar los brazos del spinner. La cercanía que tiene cada imán al colocar en cada brazo (Ver Figura 3), puede presentar un problema en la interacción al momento de aplicarlo. Es por ello por lo que la activación y desactivación de cada imán se puede producir con un electroimán el cual puede generar campos magnéticos necesarios para este fenómeno.

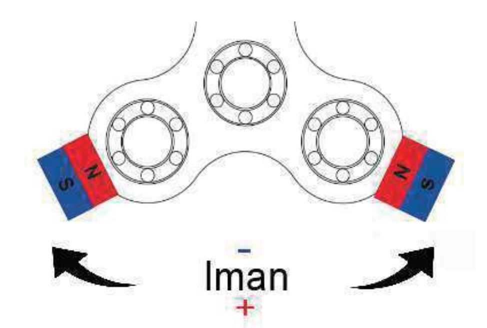


Figura 3. Análisis de spinners junto con el fenómeno magnético de los imanes.

Para producir un electroimán se consideran bobinas, las cuales son cilindros que contiene un alambre enrollado que puede tener infinidad de vueltas dependientes de la cantidad de campo magnético que se necesite. Un electroimán puede generar un polo positivo o un polo negativo esto por la conexión que se tiene en su bobina (Ver Figura 4).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



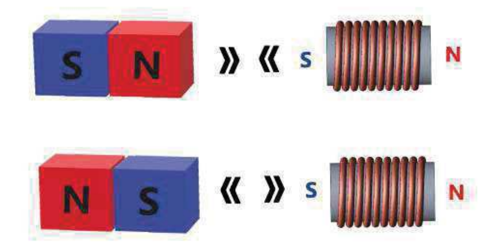


Figura 4. Fenómeno magnético de un imán junto con una bobina.

2. Método Matemático

La cinemática rotacional es de vital importancia en los comportamientos de objetos que producen un giro, los spinners al ser uno de ellos, generan una velocidad y aceleración angular dependientes de una fuerza externa. En este caso al ser impulsados por una fuerza magnética se necesita tomar en cuenta los parámetros magnéticos relacionados con las bobinas. El spinner mágnetico de tres brazos al generar un movimiento angular, la velocidad puede ser registrada con transductores que nos proporcionen sus rpm a las que puede llegar.

La siguiente figura muestra el diagrama de cuerpo libre del spinner magnético. Los 3 brazos de la estructura se encuentran con θ =120º de separación y mantiene las propiedades de un triángulo equilátero. La fuerza perpendicular al radio de cada brazo F_1, F_2, F_3 son las necesarias para generar el movimiento en el spinner ($\emptyset = 90°$) , las cuales estarán dependientes del momento individual. El radio de cada brazo es r= 71.5 mm y la masa total del spinner de 87 g. Las variables B_1, B_2 y B_3 son las 3 bobinas del sistema.

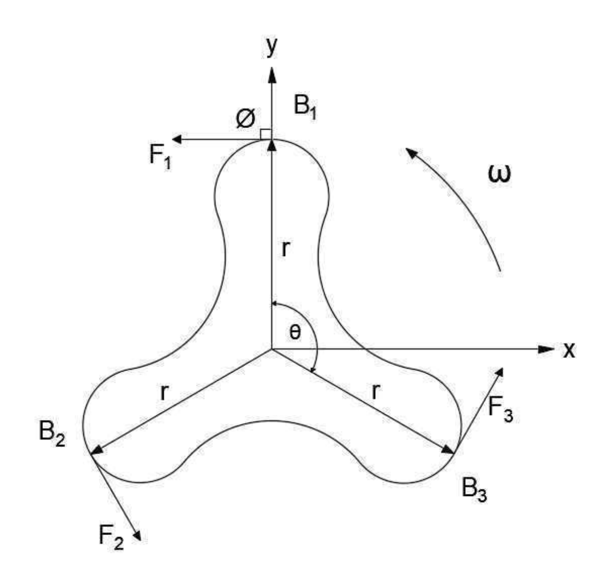


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre del comportamiento de las fuerzas en el spinner.

Para el análisis del movimiento del spinner es necesaria la cinemática rotacional del sistema. Al aplicarle una fuerza externa al spineer, esté producida en un giro. Y necesitará un momento de fuerza dependiente de la fuerza F_n que se aplica la cual es generada por cada bobina B_n. El momento es igual a la fuerza F por la distancia al centro del spinner r con $\emptyset = 90°$.

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{F} * \boldsymbol{r} \tag{1}$$



De manera semejante, como el spinner gira a un tiempo determiando, el spinner adquiere una aceleración angular ∝. El momento angular L puede ser dependiente de los parámetros: I el momento de inercia y la rapidez angular, entonces:

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{I} * \boldsymbol{\omega} \tag{2}$$

La velocidad angular ω al ser medida en rpm es adecuada para analizar el comportamiento del spinner magnético. La aceleración angular ∝ , si el movimiento es uniformemente constante entonces. (Ver ecuación 3).

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega_0} + \propto \boldsymbol{t} \tag{3}$$

En la aceleración angular se presenta una cierta energía cinética la cual se va perdiendo debido a los contactos con el aire y rozamiento con el eje del giro (zona del balero) [5]. Si bien, la aceleración anguar y velocidad angular se describen como $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$, $\propto = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$, y sabiendo que en el spinner la velocidad angular final es de 0, se puede identificar el tiempo en el que se encuentra girando el spinner $\Delta t = \frac{-\omega i}{\propto}$.

Para calcular la cantidad de fuerza que se necesita para mover un spinner magnético, se emplea el campo magnético que puede generar un electroimán (Ver ecuación 4). Donde B es el campo magnético, N el número de vueltas, L la longitud de la bobina, I la Intensidad de la bobina y μ la permeabilidad magnética. En relación con las bobinas su campo magnético debe ser mayor que el del imán, esto para generar el efecto de repulsión-atracción. Por otro lado, es necesario conocer el tipo de material con el que está hecho el núcleo de la bobina, para identificar la permeabilidad del material metálico en la mayoría de los casos.

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu}\frac{\mathbf{N}}{\mathbf{L}}I \tag{4}$$

Para identificar el número de espiras en una bobina y la permeabilidad del material metálico se emplearon las ecuaciones 5 y 6.

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{BL}}{\boldsymbol{\mu}\mathbf{I}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{k\mu_0} \tag{6}$$

La permeabilidad relativa del hierro $\mathbf{k}$ es de 200, la permeabilidad magnética del vacío o aire μ_0 esta dada por $4\pi x 10^{-7}\ T\ m/$.[6].

3. Metodología Experimental

En los estudios experimentales del spinner se obtuvieron parámentros necesarios para analizar su comportamiento físico. El spinner tuvo un giro a una rapidez de 3.59 $\frac{m}{s}$ obtenida con el sensor de efecto Hall en un tiempo de 13.56 seg. Empleando la ecuación 3 y tomando en cuenta que el spinner llegará a deterse en el tiempo mencionado, la desaceleración angular ∝, fue de 0.264 rad/s^2. El momento de inercia fue analizado en cada brazo del spinner con una masa individual de 29 g obteniendo I igual a 2.074*10^{-3} Kg*m^2. De esta manera el momento angular empleando la ecuación 2 es de 7.44*10^{-3} J$* s$.

Por otro lado para ser movido con fenómenos magnéticos, se emplearon bobinas e imanes de neodimio de 12000 gauss. Los imanes tienen dimensiones de 6 mm de circunferencia por 1 mm de espesor. La cantidad de campo magnético que se necesita para que las bobinas trabajen de la manera más correcta debe ser 3 veces más que la de los imanes, por tanto, se puede decir que se

ISBN: 978-607-9394-14-1.

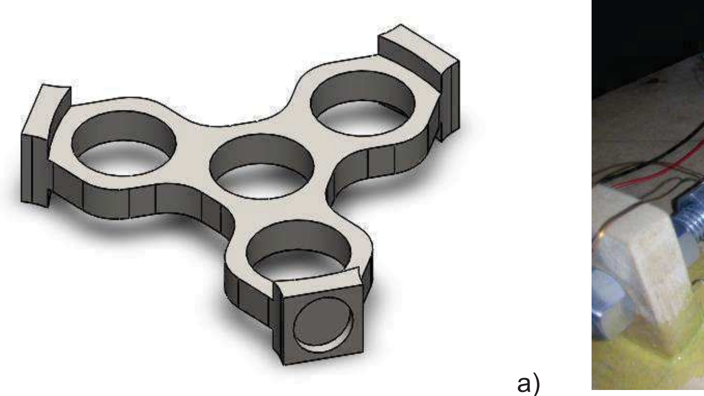


necesita un electroimán de 36000 Gauss. Sustituyendo valores en la ecuación 3, se obtiene que la permeabilidad magnética del hierro es de $2.5132x10^{-4}\ m/A$. Así como el valor del campo magnético a emplear es de 36000 Gauss. Por su parte, para la elaboración de la bobina se consideró una longitud de 50 mm, corriente de 2 amperes y 250. 79 vueltas. El alambre utilizado fue cobre de calibre 24 y una varilla roscada de ½ de pulgadas con un diámetro de 10 cm, aunque de bobinado seria de 3 cm el sobrante de la varilla roscada será para sujetar en una base la bobina y el resultado de la bobina queda de la siguiente manera. (Ver Figura 6). La fuente de voltaje fue un trasformador de 12 V a una corriente eléctrica de 3 A el cual estará conectado a un puente de diodos el cual será de 35 Amperes esto por el consumo que tiene cada bobina al estar activando y desactivando.

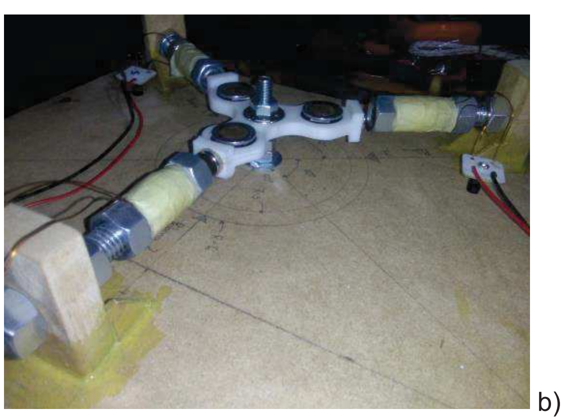


Figura 6. Diseño de electroimán.

El diseño mecánico del spinner magnético se realizó en SolidWorks, considerando las dimensiones de 6 mm de espesor, diámetro externo de 100 mm, diámetro interno de 25 mm, la placa externa para cada imán fue de 10X10 mm (Ver figura 7) del cual fue manufacturado en impresora 3D con un material ABS. Finalmente se ensamblaron las bobinas, el spinner junto con su balero, los imanes de neodimio y fueron montados se hace una base (Ver Figura 7).



a)



b)

Figura 7. a). Diseño en SolidWorks de spinner. b). Spinner completo montado en sistema.

4. Resultados

El sistema del spinner magnético final (Ver figura 8) presenta los componentes completos, donde se observa la fuente de alimentación la cual está conformada por un trasformador y un puente de diodos, las tres bobinas las cuales están posicionadas a 120º cada una y una botonera que acciona a cada una de las bobinas. Se incluirá un sensor bipolar de efecto hall el cual mediante la programación se hará que la frecuencia que emita dicho sensor se convierta en pulso y estos pulsos serán contados en un lapso de tiempo y así poder obtener las revoluciones el spinner, el sensor estará posicionado en una de las bobinas esto con el fin de que cada que se active una de las bobinas dicho sensor empiece a contabilizar cada vuelta y por tanto poder obtener las revoluciones del spinner, el sensor se empleará con un Arduino Uno. Para estudiar la activación del spinner magnético

ISBN: 978-607-9394-14-1.



con los dispositivos electrónicos se realizó un análisis del circuito en Proteus (Ver Figura 9). El circuito consta de un trasformador de 12V a 2A para alimentar las bobinas, un puente de diodos de 35A esto para convertir la corriente alterna en corriente directa y 3 interruptores previos a cada bobina. Los interruptores son los encargados de activar de manera independiente cada una de las bobinas y de esta manera controlar la velocidad del spinner magnético. Primero se activa alguna de las tres bobinas, más aún para tener un giro más prolongado se necesita que las 3 bobinas se estén activado y desactivado. Para eso se montan monedas de metal en cada contrapeso del spinner, donde al pasar la posición de la bobina esta se activa y puede repeler al imán y así obtener el giro, la posición de los contactos en este caso son dos cables.

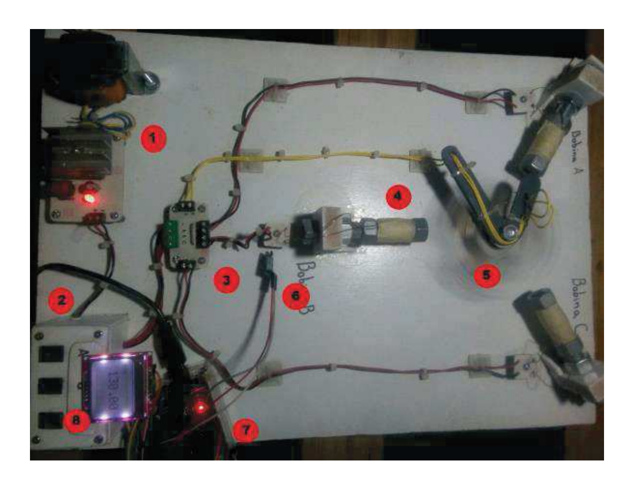


Figura 8. 1) Fuente de alimentación 12V a 2A, 2) Botones de activación por bobina, 3) Conexiones, 4) Bobina de tipo electroimán, 5) Spinner, 6) Sensor bipolar de efecto hall, 7) Arduino, 8) Pantalla para monitoreo de revoluciones.

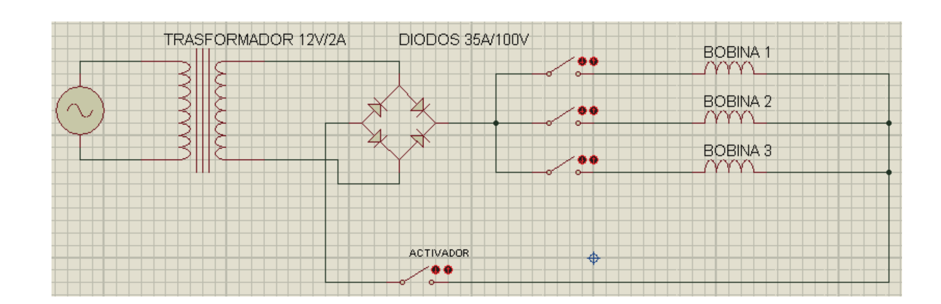
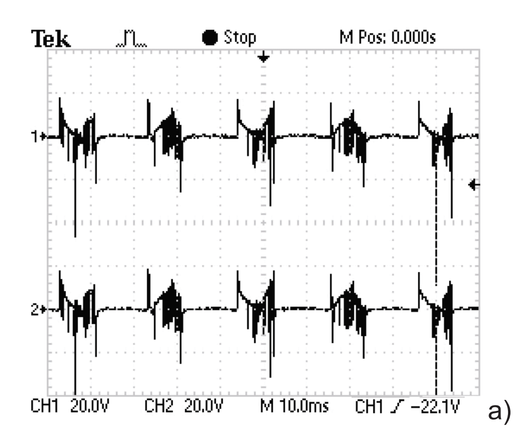


Figura 9. Circuito electrónico para la conexión de las bobinas.

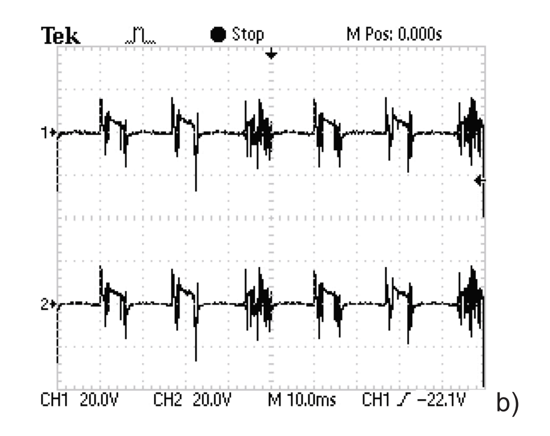
El comportamiento de las bobinas del spinner magnético es mostrado en las gráficas 10a y 10b. Las gráficas son obtenidas en un osciloscopio Tectronik TDS1002B, donde la primera gráfica muestra el comportamiento de las bobinas A y B y la segunda muestra el comportamiento de las bobinas A y C. En la primera gráfica se observa que las bobinas A y B trabajan en sincronía mostrando la señal tipo escalón donde se activan las bobinas, en la segunda gráfica se presenta para las bobinas A y C, el comportamiento es semejante y con un ligero desfase. Si bien la activación de las bobinas se realiza por medio de una moneda, esta es obtenida de una chispa al momento del contacto, por esta causa la señal de monitoreo presenta ligeras perturbaciones.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





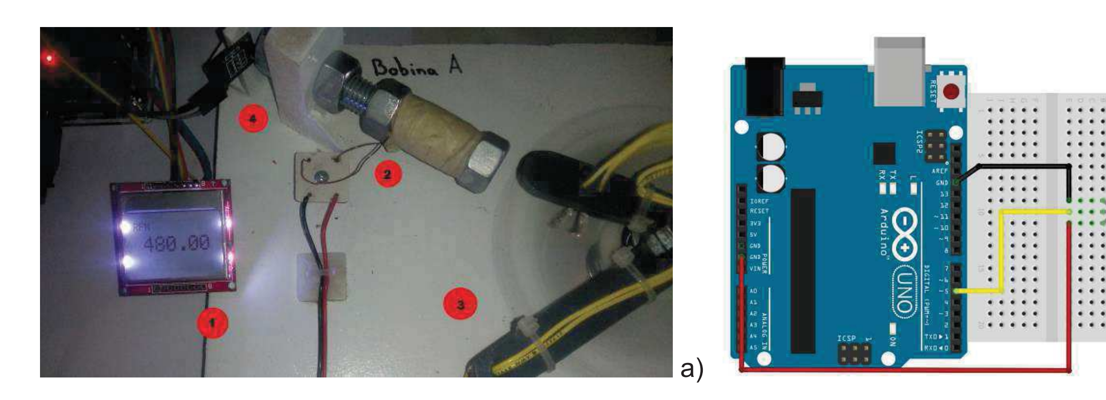
a)



b)

Figura 10. Señales de las bobinas en osciloscopio a) Comportamiento de la bobina A y B, b) Comportamiento de la bobina A y C.

Finalmente, para estudiar la velocidad y revoluciones del spinner magnético el cual esta dependiente de las bobinas A, B, C y de los imanes en cada brazo, se empleó el sensor bipolar de efecto hall UGN3503U, una tarjeta Arduino Uno y una pantalla LCD Nokia 5110 [7]. El cual se programó para que mediante la frecuencia que generaba dicho sensor se pudiera mediar las revoluciones y se observó que el valor de las rpm fueron entre 468-520. En la figura se observa un valor de las revoluciones por minuto tomado en un tiempo de 13.56 s, las cuales fueron de 480 rpm (Ver Figura 11), así como en la tabla 1 se presentan las propiedades del spinner magnético. También se muestra la conexión de la tarjeta Arduino y el sensor bipolar de efecto hall necesarios para controlar las revoluciones por minuto que genera el spinner.



a) b)

Figura 11. a) Sistema spinner con región de monitoreo de rpm. 1) Pantalla Nokia, 2) Bobina A, 3) Spinner en movimiento 4) Sensor de bipolar efecto Hall. b) Conexión de sensor bipolar de efecto hall con Arduino.

Tabla 1. Propiedades físicas del spinner magnético.

Características	Unidades
Voltaje	12 V
Amperaje	2 A
Campo Magnético	36000 G
Revoluciones	480 RPM

ISBN: 978-607-9394-14-1.



5. Conclusiones:

Los spinners son dispositivos que en la actualidad son muy populares. Si bien son objetos que al interactuar con una fuerza externa estos pueden generar cierta aceleración angular (rpm), es interesante conocer como se comportan en su naturaleza física. En este trabajo se estudio el comportamiento de un spinner magnético contemplando el estudio de las áreas mecánicas, electrónicas y magnéticas. La construcción del sistema y su control de rpm llevo desde el modelado y manufactura de una configuración de spinner de 3 brazos, hasta el estudio del fenómeno cinemático rotacional que produce la estructura del spinner al llevar una velocidad angular. El spinner logro una rapidez de 3.59 m/s a un tiempo de 13.56 segundos. El movimiento angular del spinner fue generado mediante el campo magnético de las bobinas e imanes del sistema, controlado por el contacto de cables metálicos que dan pauta a dar el sumistro de energía en el sistema y llegando a una velocidad angular de 480 rpm, la cual fue detectada con una tarjeta Arduino y un sensor bipolar de efecto Hall.

Referencias

[1] Hettinger C. "Spinning Toy", Patent Number 5591062, United States Patent, 6 paginas, Orlando 1993.

[2] Cohen E, Bravi R, Minciacchi D. "The effect of fidget spinners on fine motor control", Scientific Reports, Department of Experimental and Clinical Medicine, Physiological Sciences Section, University of Florence, Florence, Italy, 2018.

[3] Baldor J. A. "Geometría plana y del espacio", Publicaciones Culturales S.A. de C.V., México, Vigésima Reimpresión, 2004.

[4] Anderson J. "Structural and Magnetic Properties of Neodymium-Iron-Boron Clusters", Mechanical and Materials Engineering, Department, University of Nebraska-Lincoln, 55 pp., Lincoln Nebraska 2010.

[5] Raymond A, Serway. Beichner R.J. "Física para ciencias e ingeniera", Interamericana Editores, S.A. de C.V., México, quinta edición, 2002.

[6] Cantú L. "Electricidad y Magnetismo para estudiantes de ciencias e ingenierías", Editorial Limusa, México, 1975.

[7] Antorino J, Bortolin L, Rodriguez E, Farias R, Rodriguez E. "Experimentos con un sensor de efecto hall", Departamento de Física, Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Favaloro, Buenos Aires, Argentina 2009.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 13, pp.147-158.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Prototipo de un Sistema de Visión para la Determinación del Estado de Maduración del Mango Ataulfo

Velázquez Sedano Luis Fernando y García Luna Francesco José

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

En el presente artículo se muestra un sistema de visión por computadora que consta de una cámara RGB como sensor de visión y un sistema bajo condiciones controladas. El objetivo del sensor es capturar una imagen de un mango Ataulfo, obtener el porcentaje de coloración amarilla que tiene el mango en su corteza y decidir, en base a esto, si el mango puede estar maduro o no; esto se logra a través de técnicas de procesamiento de imágenes, con lo cual se calcula una razón entre el número de pixeles existentes y el número de pixeles totales del mango. Se muestran resultados experimentales del desempeño del sistema de visión aplicado y algunas propuestas de trabajo a futuro para robustecer el sistema.

Palabras clave: Sistema de visión, mango Ataulfo, coloración, porcentaje de madurez.

1. Introducción

La decisión del agricultor a la hora de cosechar un fruto es muy importante ya que este decide si es momento de cosecharse o si este debe esperar a que el fruto madure mas. Sin embargo, este proceso se realiza de forma manual, pudiendo dañar al fruto.

En la actualidad en el campo de la agricultura se han desarrollando sistemas automatizados para aumentar la productividad. Dentro de sus aplicaciones se encuentran tareas como monitoreo e identificación de frutos. Este proceso se ha dado en muchas otras especies de frutos, por ejemplo, en manzanas que, utilizando sistemas de visión, pueden ser identificadas en una escena natural.

En Colombia la exportación del mango se caracteriza por el tratamiento manual que se le da a este y sobre todo la clasificación acorde a los criterios de calidad para la exportación del fruto. Sin embargo, se propuso realizar un sistema automatizado que clasificara los mangos que eran aptos para la exportación [10].

Este proceso de monitoreo e identificación o selección de frutos se a dado en muchas otras especies de frutos. Se encuentran en frutos como las manzanas que, utilizando sistemas de visión, pueden ser identificadas en una escena natural pero enfocándose solo en las regiones de interés pueden eliminar la influencia de los fondos blancos [11].

Enfocándose solo en las regiones de interés se pueden eliminar la influencia de las saturaciones [1]; los frutos rojos, a diferencia de los chiles verdes, son fáciles de identificar por su contraste de color con las hojas y tallos; estos son predominantemente rojos y es posible identificarlos aún en ambientes donde su color no tenga contraste con el fondo utilizando otras técnicas [2]. Otro ejemplo son las lechugas que son monitoreadas en ambientes de tierra y agua controlados, y en base al análisis de imágenes es posible determinar su necesidad de agua [3], entre otros.

La razón principal por la que se realizan diferentes estudios en diferentes frutos es porque se asegura que la mecanización de las recolección y la clasificación puede reducir la mano de obra y



mejoraría la tasa de calidad de las frutas, sin embargo hasta el día de hoy la cosecha de frutos sigue siendo un trabajo estacional y de mano de obra manual.

El mango Ataulfo de Soconusco, Chiapas, es un producto de origen Mexicano. Los principales productores son Chiapas (36%), Guerrero (29%) y Nayarit (19%), que registran el 84% del volumen generado en el país [4]. Tiene un peso promedio de 350 grs.; una composición promedio de 69% de pulpa, 19% cáscara y 8.5% semilla, la pulpa es de consistencia firme con muy poco contenido de fibra, con sabor dulce y baja de acidez, con cáscara firme y de color amarillo [5].

La tarea de monitoreo y determinación de madurez de el mango Ataulfo puede realizarse mediante un sistema de visión por computadora. Este sistema se conforma principalmente de sensores de visión (que en este caso es una cámara RGB), un sistema de iluminación artificial para la eliminación de ruido, reflejos o sombras, el algoritmo de procesamiento de imagen y el algoritmo de decisión que, en base a las técnicas de procesamiento determinará si el mango puede estar maduro o no.

El artículo se divide en cuatro secciones: En la sección 1 se presenta una breve introducción sobre en trabajo de la robótica en la agricultura. En la sección 2 se muestra la contribución principal, la cual engloba modelos de sistemas de visión artificial, segmentación y procesamiento de imágenes y algoritmos de decisión. En la sección 3 se muestran los resultados de los experimentos realizados. Por último, en la sección 4 se muestran las conclusiones y las propuestas de trabajo a futuro.

Este articulo muestra los resultados del algoritmo de decisión de maduración del mango Ataulfo en función de su coloración.

2. Contribución Principal

Se diseñó y programó un algoritmo de visión por computadora para identificar el porcentaje de coloración amarilla del Mango Ataulfo bajo condiciones controladas de iluminación; y en base a esta característica determinar la posibilidad de que el fruto se encuentre maduro.

2.1 Sistema de visión.

Los sistemas de visión por computadora tienen como objetivo generalmente utilizar cámaras para capturar y analizar imágenes del mundo real. Todo se puede responder en base a imágenes y vídeos grabados. Las áreas de aplicación se han extendido debido a un solido crecimiento [6].

Un sistema de visión esta formado de forma general por dos conjuntos de subsistemas que son capaces de realizar las funciones de: Adquisición de imágenes y Análisis y/o procesamiento de imágenes [7].

La adquisición de imágenes permite almacenar una escena de forma digitalizada. Los elementos necesarios para la adquisición son:

- Iluminación.
- Sensor o lente que transforman información luminosa en una señal digital.
- Tarjeta de procesamiento digital que normalmente ya viene incluida en la PC.

El análisis de la imagen engloba todas las técnicas que permiten extraer información de los objetos que componen la escena. Esta técnica se puede resumir en 4:

- Pre-procesado. En esta fase se prepara la imagen haciendo mejoras modificando algunas características.
- Segmentación. Esta parte divide la escena en partes con características similares u en

ISBN: 978-607-9394-14-1.



objetos.

- Descripción. Que consiste en extraer las características de un objeto para reconocerlo en la escena.
- Reconocimiento. Que este consiste en identificar los objetos en base a las características establecidas.

La iluminación es uno de los requisitos más importantes para ambientes interiores para la visibilidad adecuada en un espacio. Una buena iluminación requiere igual atención tanto en la cantidad como en la calidad de la luz. La luz artificial es indispensable cuando la luz natural desaparece. Cuando se ilumina una habitación se deben conocer los efectos que provoca cada tipo de luz artificial y así la que se seleccione no representará ningún problema.

Con el fin de obtener mejores resultados se decidió utilizar iluminación general difusa. En los ambientes con este tipos de iluminación, un estimado del 50 por ciento de la luz se dirige de forma difusa hacia el techo para ser reflejada desde ahí, mientras que, el otro 50 por ciento se envía de manera difusa hacia la zona a enfocar. En estos ambientes no se producen sombras, pero sí se emite una luz agradable.



Figura 1. Ejemplo de iluminación difusa. (Kirkman, 2016)

Para este sistema de visión se empleó una cámara web como sensor de visión para adquirir la imagen en formato de vídeo. La adquisición de la imagen es en formato RGB de una resolución de 480X360 pixeles a 30 frames por segundo.



Figura 2. Cámara RGB 2.0 MP (Amazon, 2015)

El sensor se colocó en una posición fija perpendicular a el plano sobre el que se colocó el mango con el fin de tener un mejor soporte para el mango y no tener que ajustar la cámara en cada cambio.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2 Segmentación de mango Ataulfo en tiempo real.

Una de las principales características de este mango es que en su estado de crecimiento comienza con un color verde y conforme va madurando su cascara se torna de un color amarillo oro [8].



Figura 3. Mango Ataulfo maduro. (ICA, 2013)

La función principal del algoritmo es identificar y segmentar el mango, y una vez identificado determinar si puede ser maduro o no en función del color.

Debido a que se esta trabajando en un espacio controlado y con un fruto especifico, existen ciertas condiciones que se deben tomar en cuenta pera obtener mejores resultados:

- Se debe cuidar que la iluminación no genere brillo o sombras sobre el fruto en cuestión.
- El sistema solo analizara un mango a la vez.
- El sistema se diseñó únicamente para el mango Ataulfo.
- Se considera únicamente el color del mango como característica principal para determinar si puede ser maduro o no.

La elección correcta de un espacio de color va a influir directamente en los resultados del procesamiento de una imagen, conocer los diferentes espacios de color puede facilitar la elección de un espacio de color adecuado. [12]

El espacio de color primario (RGB) se describe con tres componentes R (rojo), G (verde) y B (azul). El valor de estas tres componentes varia en función de la sensibilidad respectiva y la luz entrante. Este modelo esta basado en un sistemas de coordenadas cartesianas, normalmente se representa en un tetraedro en el que los 3 componentes (RGB) se representan como los 3 vectores espaciales y el punto más alejado al origen es la saturación de estos 3. [13] Véase la figura 4.

El espacio de color CMY es un espacio de color secundario. Los colores del modelo CMY son los corresponden a los primarios luz, es decir, el Cyan, Magenta, Amarillo y a estos se les suma el negro. Este modelo se basa en la cualidad de absorber y rechazar la luz de los objetos. En este modelos a diferencia del RGB el blanco se genera cuando los componentes tienen valores de cero y el negro con la saturación de los 3 colores. [13] Véase la figura 5.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



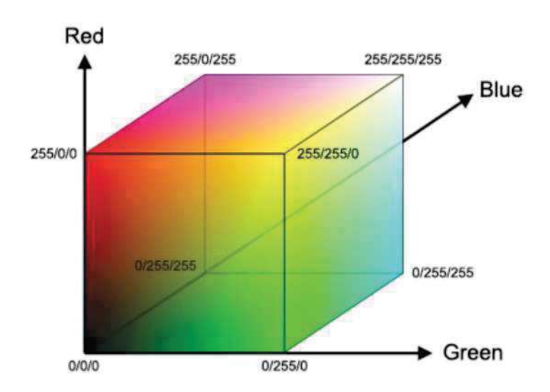


Figura 4. Representación del espacio de color RGB (Arias, 2014)

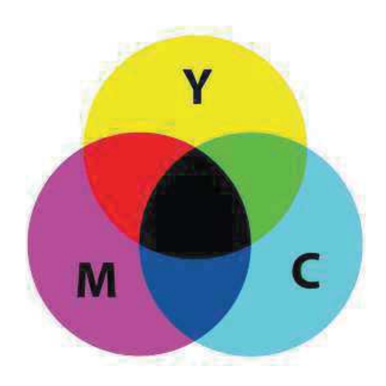


Figura 5. Espacio de color CMY (Wang, 2016)

Debido a que el color dominante del fruto maduro es amarillo se decidió utilizar el espacio de color secundario CMY, ya que a diferencia del RGB, el amarillo se obtiene directamente, por lo que es más fácil eliminar los demás planos del espacio CMY y quedarnos únicamente con el canal correspondiente al amarillo. De esta forma se hace más sencillo el análisis del fruto. Al aplicar técnicas de segmentación selectas es posible eliminar lo canales Cyan y Magenta obteniendo únicamente el color amarillo, de esta manera al aplicar un filtro de umbralización y uno de binarización los pixeles distintos al valor del canal amarillo se les dará valor de 0 y a los pixeles que estén dentro del canal Amarillo se les dará valor de 1 para resaltarlos en la imagen, obteniendo así una imagen binarizada de blancos y negros.

Para segmentar la imagen y darle el procesamiento necesario utilizaremos filtros de umbralización y binarización. La segmentación subdivide una imagen en sus partes constituyentes u objetos, con el fin de separar las partes de interés del resto. Por lo tanto el tipo de subdivisión depende del problema a resolver. [13]

La umbralización se define como una función que convierte una imagen con diferentes tonalidades en una imagen en blanco y negro. Se selecciona un umbral que permita agrupar los pixeles de una imagen diferenciándolos del fondo. De esta manera la segmentación se basa en la elección de uno o varios umbrales que permiten agrupar los puntos de la imagen en regiones de características similares en función de sus niveles de gris. [13] En este caso se aplicara un filtro umbral con el fin de convertir la imagen a una escala de grises en la que la escala permitirá al programa definir que puntos son los que tienen mayor saturación amarilla al haber eliminado los otros 2 planos de color restantes. Véase el inciso a) de la figura 6. Una vez umbralizada se aplicara el filtro de binarización.

Los pixeles de una imagen binarias pueden asumir solo dos valores, 0 o 1. En base a la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



escala de grises previamente obtenida el sistema separará los pixeles mas significativo de los menos generando así la imagen binaria del mango. Véase el inciso b) de la figura 6.

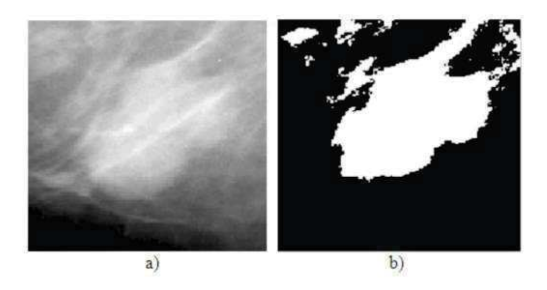


Figura 6. Ejemplo de imagen umbralizada y binarizada. (Faustino, 2015)

Se diseñó un algoritmo (mostrado como Algoritmo 1) que cumple con la función de segmentar el mango Ataulfo tomando en cuenta sus colores amarillo y verde. Y, en base a ello, decidir si puede ser maduro o no.

Algoritmo 1. *Algoritmo de Identificación de Madurez de Mango Ataulfo.*

1. Acceder a los datos de la cámara.
2. Extraer la imagen a color original RGB @ 480x360px.
3. Cambiar la imagen al espacio de color CMY.
4. Aplicar filtros para eliminar el fondo.
5. Realizar una función de limites para determinar la ROI (región de interés).
6. Contar y almacenar todos los pixeles y que están dentro de la ROI y sus coordenadas.
7. Aplicar una técnica de umbralización para eliminar los verdes que puedan existir.
8. Binarizar la imagen.
9. Contar y almacenar los pixeles que aun existen dentro de la ROI y sus coordenadas.
10. Calcular una razón entre el número de pixeles que permanecieron y los pixeles totales de la ROI.
11. Sacar el porcentaje de diferencia.
12. En base a el porcentaje obtenido decidir si el fruto puede ser maduro o no.

El algoritmo de decisión se basa en el numero de pixeles que aun permanecen después del procesamiento de la imagen. El programa de procesamiento de la imagen lo basamos en la idea de que la coloración amarilla, en el caso exclusivo de el mango Ataulfo, define la madurez del mango, por lo menos a simple vista sin haber abierto y probado el mango.

Una vez que se concluyo que el color es factor clave en la maduración se decidió utilizarlo para el algoritmo de decisión. El diseño del programa se realizo con técnicas de procesamiento de umbralización, detección de bordes y binarización. La base teórica que planteamos es que en una escala de grises, en el espacio de color CMY y eliminando los planos cyan y magenta, los amarillos con mayor saturación permanecerían como pixeles blanco de valor 1 y los diferentes a estos se

ISBN: 978-607-9394-14-1.



convertirían en pixeles negros o de valor cero. Al realizar un conteo de cada pixel y almacenando su valor numérico se puede conocer la posición y el valor y colocarlos en una matriz, una vez que se aplique el filtro de umbralización los pixeles que estén por debajo del valor amarillo necesario se convertirán el ceros, al hacer una comparación de la matriz obtenida de la imagen sin el filtro y la nueva matriz de la imagen con el filtro se puede saber el numero de pixeles que cambiaron su valor y así calcular una razón entre ambos.

2.3 Algoritmo de decisión.

Un algoritmo de decisión se presenta cuando la solución a un problema establece una pregunta para decidir que acciones deben tomarse. La función el algoritmo es, en base a características, datos, etc., realizar una decisión y darle una dirección al código para que este continué según las condiciones que se presentan. La condiciones se especifican usando expresiones lógicas [9].

Se propone que la función decida si el fruto es maduro o no en base al parámetro establecido comparado con el resultado de la prueba. Para esto era indispensable definir que tipo de estructura se iba a utilizar. Según la necesidades de el sistema se decidió utilizar una estructura de decisión doble. Estas estructuras que permiten decidir entre dos acciones, es decir, en ambos casos, que se cumpla o no la condición, habrá la ejecución de una acción. Se utilizan cuando se tienen dos opciones de acción, por la naturaleza de la estructura se debe ejecutar una acción pero no ambas a la vez, es decir, son mutuamente excluyentes.

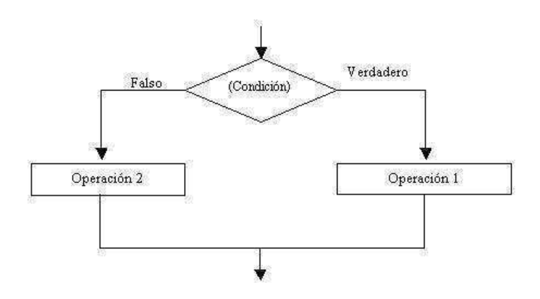


Figura 7. Estructura de decisión doble. (Avalos, 2017)

Una vez que se decidió cual seria la estructura de decisión, se estableció el parámetro de decisión para el algoritmo, para ello se realizó un experimento. Se obtuvo una muestra de 10 mangos al azar y se descartaron de forma arbitraria los que a nuestra consideración estaban maduros, de la misma forma con los que estaban muy inmaduros. En base a esto, en la parte de experimentación se iban a obtener los porcentajes de aceptación mínima del mango que se consideraba maduro y este porcentaje se asignará como parámetro de comparación para el algoritmo de decisión final.

3. Resultados.

Se sometieron 10 mangos verdes y 10 maduros a pruebas para entrenamiento del sistema. El fin del entrenamiento es establecer un umbral optimo para el procesamiento de las imágenes. Una vez que se obtuvieron los umbrales para cada mango se calculó el promedio para utilizar el umbral mas optimo, el resultado fue de: 0.104. Una vez que se calculo el umbral optimo se sometieron de nuevo a prueba los 10 mangos que se consideraban inmaduros para obtener el limite inferior de aceptación. Los resultados se promediaron para obtener un limite mas optimo y el resultado fue de: 49.78% por lo que este se estableció como la cota inferior.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una vez que se estableció el porcentaje mínimo de aceptación se realizaron las pruebas finales con diferentes mangos a los utilizados para el calculo del umbral y de la cota inferior. El mango que se utilizó fue un mango que se consideró maduro y comestible pero su coloración no era del todo amarilla como se muestra en la Figura 8 y se obtuvieron los siguientes resultados:

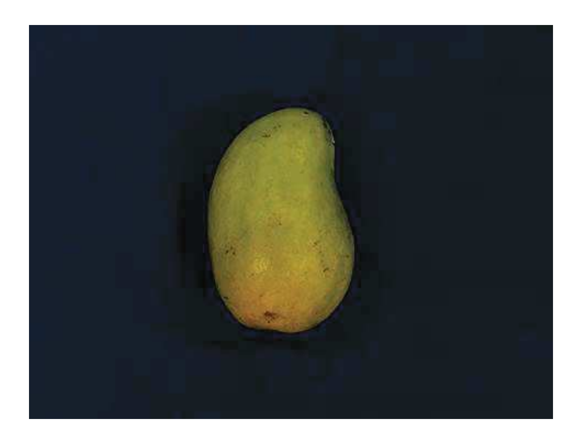


Figura 8. Mango Ataulfo de prueba.

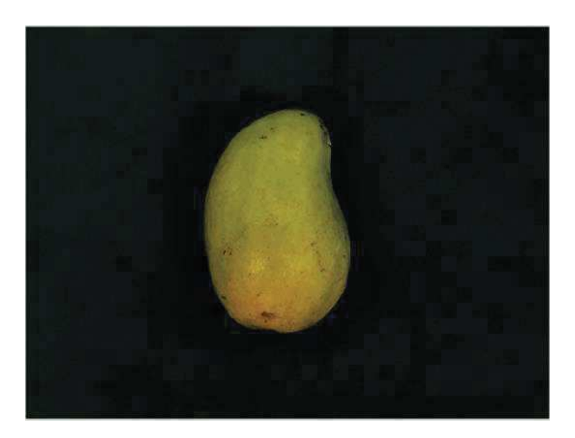


Figura 9. Imagen del mango Ataulfo pre-procesada donde se elimino el fondo para obtener únicamente el mango.

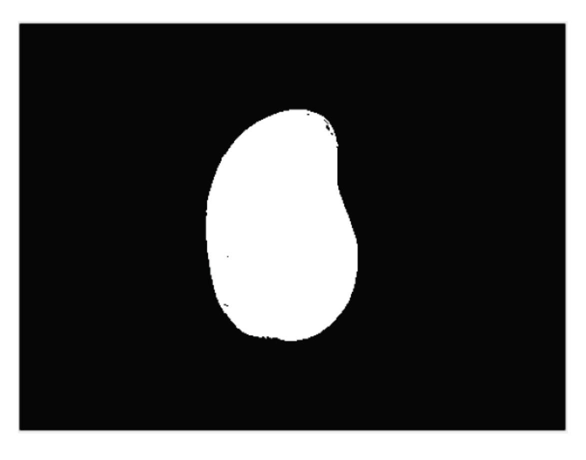


Figura 10. Resultado tras binarizar el mango para obtener su silueta completa y conocer el numero de pixeles que contiene el mango.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



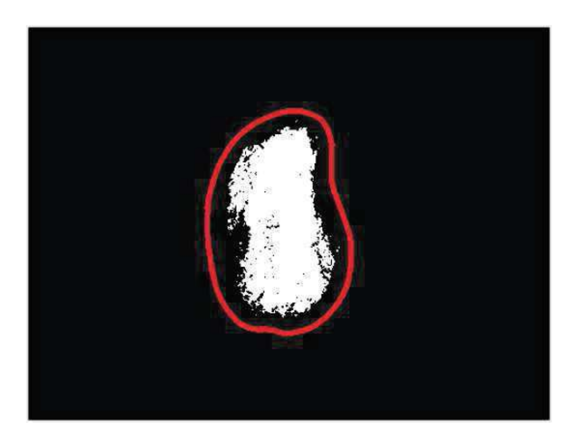


Figura 11. Resultado tras umbralizar y binarizar la imagen para contar el numero de pixeles aun presentes y calcular una razón entre estos y el numero de pixeles totales de la ROI.

- En la Figura 9 se puede observar la foto captada en RGB con un tamaño de 480X360 pre-procesada, es decir, se aplico un filtro para eliminar todo lo que había de fondo quedándose únicamente con el mango.
- En la Figura 10 podemos observar una binarización de 1 y 0 para resaltar al mango y poder obtener su silueta y a la vez realizar un conteo de todos los pixeles que existen dentro de esta.
- En la figura 11 se observa la imagen del mango con un umbralizado y binarizado con el fin de contar cuantos pixeles permanecen dentro de la silueta y obtener un porcentaje.

El resultado de esta prueba en particular arrojo que el mango tenia un 52.07% de coloración amarilla en su piel, lo que permitió deducir, en base a la cota inferior previamente establecida, que el mango a pesar de su coloración amarilla era un posible mango maduro.

Posterior a eso se realizaron dos experimentos más utilizando un mango que se consideró verde y uno que se considero maduro para comprobar que el primero estaría por debajo del porcentaje establecido y el que segundo estaría por encima.

En el primer experimento con el mango verde que se muestra en la figura 12 se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 12. Mango Ataulfo que se considero verde. Se muestran sus 4 etapas de procesamiento y su resultado fue por debajo de la cota inferior establecida.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



- En la figura superior izquierda se puede observar la imagen original del mango que se considero verde antes de ser procesada.

- En la figura superior derecha se observa la imagen del mango pre procesada. En este punto se elimino el fondo y se obtuvo solamente el mango.

- En la figura inferior izquierda se muestra la imagen del mango para obtener el numero de pixeles totales del mango y la silueta.

- En la figura inferior derecha se muestra la imagen procesada con el numero de pixeles que permanecieron dentro de la silueta.

Este experimento arrojo como resultado que el porcentaje de coloración era de el 26.73%; claramente se observa que el resultado esta muy por debajo de lo considerado cota inferior por lo que se pudo descartar la posibilidad de que el mango pudiera estar maduro basándose en la característica del color.

En el segundo experimento con el mango que se considero maduro que se muestra en la figura 13 se obtuvieron los siguientes resultados:

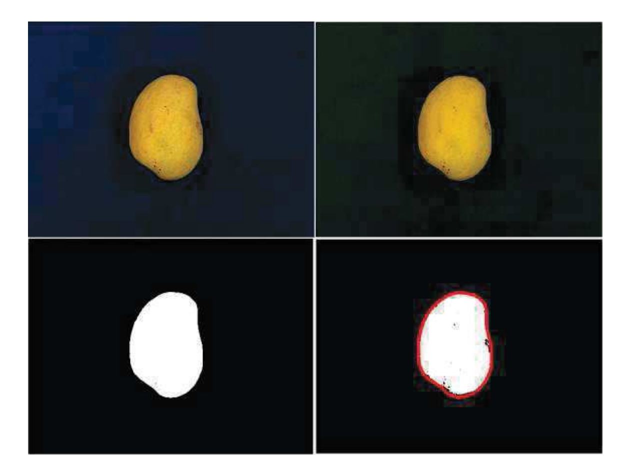


Figura 13. Mango Ataulfo que se considero maduro. Se muestran sus 4 etapas de procesamiento y su resultado fue por encima de la cota inferior establecida.

- En la figura superior izquierda se muestra la imagen original del mango que se consideró maduro.

- En la figura superior derecha se muestra la imagen pre procesada en la que se elimino el fondo y se obtuvo únicamente el mango.

- En la figura inferior izquierda se muestra la imagen del mango de la que se obtendrá el total de pixeles y la silueta.

- En la figura inferior derecha se muestra el resultado del procesamiento de la imagen y el numero de pixeles que permanecieron dentro de la silueta.

Este experimento arrojo como resultado que el porcentaje de coloración era de el 96.98%; claramente se puede observar que esta muy por encima de lo considerado cota inferior por lo que se pudo considerar que este mango pudiera ser maduro basándose en la característica del color.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Conclusiones y Trabajo a futuro.

De los 20 experimentos que se realizaron, 19 resultaron satisfactorios, es decir, al someterse a prueba el porcentaje que arrojaban coincidía con el establecido, ya que los que estaban por encima del 49.78% establecido como inferior, al abrirse, efectivamente, estaban maduros. Los que estaban por debajo del 49.78% y se consideraron verdes, al abrirlos se comprobó que aun eran muy verdes por lo que no se podían comer.

Dentro de los resultados fallidos tuvimos dos falsos positivos que arrojaron resultados muy cercanos al establecido como menor. Estaban cerca del 52% y se consideraron maduros por estar por encima del minimo establecido, pero al abrirlos se vio que estaban verdes y no eran agradables al comerse. Esto permitió establecer un rango de variación de ±5%.

Sin embargo, se demostró que el algoritmo de segmentación de los mangos es funcional y el resultado se acerca a la realidad en cuanto a la madurez del fruto basándose en el color.

Como trabajo futuro se propone robustecer el sistema de visión agregando otras variables como la textura de la corteza del fruto, el tamaño promedio de mangos maduros o analizar varios mangos a la vez. Se propone también realizar un análisis de experimentos para comprobar cuáles son las características predominantes para la estimación de la madurez del fruto.

Referencias

[1] W.Qu,W.Shang,Y.Shao,D.Wang,X.Yu,andH.Song,"Segmentation of foreground apple targets by fusing visual attention mechanism and growth rules of seed points," Spanish Journal of Agricultural Research, 2015.

[2] Y. Song, C. Glasbe, G. Horgan, G. Polder, J. Dieleman, and G. van der Heijden, "Automatic fruit recognition and counting from multiple ima- ges," Preprint submitted to Biosystems Engineering, 2013. [3] D. F. Pacheco, D. E. Henarejos, A. R. Canales, J. Conesa, and J. M. M. Martínez, "A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of spain," ELSEVIER, 2013.

[4] SAGARPA. (2015, jan) Márgenes de comercialización. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/71353/MargenesComerMangoAtaulfoEne2015.pdf

[5] OMPI. (20015, jan) Declaratoria general de protección de la denominación de origen mango ataulfo del soconusco Chiapas. [Online]. Available: http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file id=220959

[6] R. Klette, Concise Computer Vision. An Introduction into Theory and Algorithms. Springer London Heidelberg New York Dordrecht, 2014.

[7] G. de Robotica Educativa UAH. Sistemas de visión artificial. [Online]. Available: www.roboticaeducativa.org/mod/resource/view.php?id=2051

[8] R. R. Sánchez, M. V. Ochoa, M. C. Valenzuela, F. V. Ortiz, A. Castelo, F. Z. Ayala, and G. G. Aguilar. (2013, jan) Determinación del estado de madurez óptimo de mango "ataulfo" destinado a procesamiento mínimo. [Online]. Available: http://www.horticom.com/pd/imagenes/66/149/66149.pdf [9] S. Aquino. (2007, aug) Decisiones simples y dobles. [Online]. Available: https://es.slideshare.net/salomonaquino/ clase- 6- decisiones- simples- y- dobles

[10] Bermúdez, A. M. Un prototipo mecánico para la automatización del proceso de selección del mango tipo exportación. Revista Ingenierías Universidad de Medellín (2012).

[11] Weifeng Qu, Wenjing Shang, Y. S. D. W. X. Y., and Song, H. Segmentation of foreground apple targets by fusing visual attention mechanism and growth rules of seed points. Spanish Journal of Agricultural Research (2015).

[12] Marko Tkalcic, J. F. T. Colour spaces - perceptual, historical and applicational background. Faculty of electrical engineering University of Ljubljana (2001).

[13] Nora La Serna Palomino, U. R. C. Técnicas de segmentación en procesamiento digital de imágenes. Revista de ingeniería de sistemas e informática (2009).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[14] Amazon. (5 de Marzo de 2015). Amazon. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de Amazon: https://www.amazon.ca/Webcams-CH-8050-Wolverine-Webcam-Camera/dp/B00LSVAYLA

[15] Arias, A. (6 de Noviembre de 2014). Modelos de color RGB y CMYK. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de Ilustracion y presentacion de proyectos: http://ilustracionypresentaciondeproyectos.blogspot.mx/2014/

[16] Avalos, I. (27 de Octubre de 2017). UAN. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de UAN: http://correo.uan.edu.mx/~iavalos/Estructuras%20de%20desicion.html

[17] Faustino, A. (18 de Abril de 2015). El proceso de segmentación automática de lesiones patológicas en imágenes de mamografías . Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de monografias: http://www.monografias.com/trabajos94/proceso-segmentacion-automatica-lesiones-patologicas-imagenes-mamografias/proceso-segmentacion-automatica-lesiones-patologicas-imagenes-mamografias2.shtml#ixzz5En7xkrOT

[18] ICA. (31 de Julio de 2013). ICA. Recuperado el 2 de Mayp de 2018, de Instituto Colombiano Agropecuario: https://www.ica.gov.co/Noticias/Agricola/2013/El-ICA-mejora-la-sanidad-del-cultivo-de-mango-en-e.aspx

[19] Kirkman, T. (20 de Abril de 2016). B&H. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de bhphotovideo: https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/tips-and-solutions/softbox-introduction

[20] Wang, Y. (25 de Marzo de 2016). Researchgate. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de Researchgate: https://www.researchgate.net/figure/a-Subtractive-CMY-model-b-CMY-color-space_fig1_299415850

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 14, pp.159-179.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de un Vehículo de Cuatro Ruedas con Direccionabilidad Delantera Independiente

Diaz-Hernandez Octavio[1]; Rodríguez Huitrón Samuel[2] y Bernal Díaz Arcelia[1]

[1]Facultad de Estudios Superiores Aragón
[2]Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Los vehículos motorizados de cuatro ruedas que circulan por las calles hoy en día aún conservan la dirección en las dos llantas del eje delantero, con las cuales se controla el automóvil y su maniobrabilidad es baja debido a que los ángulos de giro se encuentran limitados. Dicho sistema de dirección ha prevalecido por muchos años, obligando a los conductores a lidiar con las restricciones de maniobrabilidad que implica. En este trabajo se estudió un modelo de vehículo de cuatro ruedas a escala del tamaño promedio de un automóvil convencional, cuyas ruedas frontales pueden girar ángulos de 180 grados, e incluso mayores, sin restricción alguna. Para este trabajo, se programaron dos algoritmos distintos para el control de las llantas: 1) el sistema de dirección convencional o Ackerman, y 2) un sistema de direccionamiento independiente, el cual coordina el ángulo de giro de las llantas delanteras. En los resultados se observó que fue posible desplazar el vehículo en un espacio de trabajo con cada modo de dirección y con lo que se efectuó una comparación entre ellas. Este sistema de dirección independiente en los vehículos tiene el potencial de mejorar la maniobrabilidad de los automóviles e impactaría positivamente en el sistema de conducción actual.

Palabras clave: Robot móvil, ruedas con dirección independiente, maniobrabilidad, control.

1. Introducción

1.1 Aspectos generales.

El control de la dirección en los autos convencionales se encuentra regido por articulaciones mecánicas y no permite que las llantas giren en un ángulo mayor a 30 grados. Recientemente, con ayuda de los robots móviles, se ha estudiado el reemplazo del mecanismo de dirección tradicional (Ackerman) por módulos independientes de dirección en cada rueda. A la fecha, existen distintos tipos de configuraciones de robots con llantas, en particular algunos donde sus ruedas tienen la capacidad de girar ángulos de hasta 180 grados de manera independiente, por lo que su maniobrabilidad aumenta y un vehículo con estas características podría manejarse en espacios más reducidos [1-2].

En 1999, se diseñó un vehículo eléctrico de tracción delantera que incorporó un mecanismo de dirección capaz de hacer virar las ruedas delanteras en un intervalo de 90 grados. Las proporciones del mecanismo de dirección fueron determinadas mediante un programa de optimización para minimizar el error de la geometría Ackerman. El propósito fue utilizarlo como repartidor urbano [3].

En 2002 se propuso un modelo de robot con llantas direccionables frontales para transportación en terminales aéreas o carros de autoservicio, modelándolo como desde el punto de vista cinemático. Su robot, llamado Cycab, tiene llantas traseras motorizadas su rotación está especificada de acuerdo con los ángulos de las llantas delanteras [4].

En 2008 se reportó el control de dos llantas independientes, dispuestas una en el frente y otra en la parte posterior. Este control consiste en una retroalimentación para la linealización del sistema

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 14, pp.159-179.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



noholonómico basado en el modelo cinemático inverso y superficies deslizantes. Sin embargo, es demasiado teórico y sus pruebas se limitan a simulaciones matemáticas [5]. Ver Figura 1.

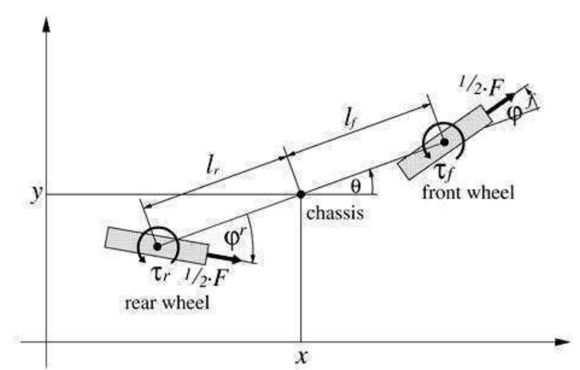


Figura 1. Esquema de dos llantas direccionables en un robot móvil. Tomada de [5].

En 2010, se experimentó con un robot móvil de llantas frontales motorizadas que podían ser orientadas independientemente. El concepto matemático que calculó los parámetros para controlar las ruedas del robot fue la *llanta virtual,* establecido a partir de la cinemática de robots móviles. Se comprobó la teoría hasta entonces simulada, en un prototipo real de manera exitosa. Para este trabajo se usó dicho concepto matemático que puede coordinar dos o más llantas direccionables, haciendo coincidir los ejes de rotación hacia el centro instantáneo de rotación, utilizando para ello la cinemática de robots móviles [6].

En 2011, se realizaron experimentos con un prototipo de vehículo el cual evadía colisiones mediante los sistemas *Steer by wire* y *Differential drive* utilizando la formulación Ackerman para controlar las dos llantas frontales independientes manejadas por servomotores [7].

En 2016 se presentó un sistema de dirección y tracción en las cuatro ruedas de un vehículo eléctrico con alta maniobrabilidad y flexibilidad para espacios reducidos. Un sistema de dirección mecánica en las llantas frontales controla el vehículo a altas velocidades y en conjunto con un sistema de dirección omnidireccional independiente con *Steer-by-wire* permiten al vehículo maniobrar en espacios reducidos [1].

En este trabajo, se desarrolló un modelo de vehículo de cuatro ruedas con llantas delanteras direccionables y dos llantas traseras motorizadas para la tracción. El modelo se ha ajustado a la geometría de un automóvil. Se implementaron dos modos de direccionabilidad: Ackerman y direccionabilidad independiente. De esta forma se comparará la maniobrabilidad del vehículo entre cada modo de direccionabilidad.

2. Vehículo de cuatro ruedas con dirección independiente

En esta sección se describirá un modelo de vehículo con un modo de dirección diferente al actual, ya que representa una oportunidad de *mejora*, *extensión* o *variante* de un producto existente en el mercado, como lo son los automóviles. Además de que el modelo desempeñe un modo de dirección independiente se le ha programado la capacidad de replicar el modelo de direccionamiento actual, es decir, el Ackerman.

A continuación, se presentan los diferentes elementos que conformaron al vehículo diseñado, así como su puesta en funcionamiento.

2.1 Arquitectura general del vehículo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La arquitectura está compuesta por 1) el Chasis, 2) el Control de posición angular para la maniobrabilidad por parte del usuario (piloto), 3) la Comunicación entre el usuario y el vehículo, 4) el Procesador de la información y los algoritmos de control, y 5) los Actuadores y Sensores (Figura 2).

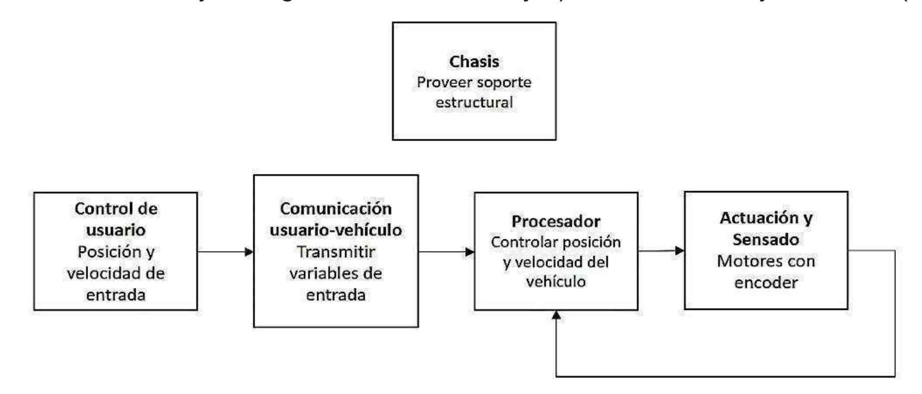


Figura 2. Arquitectura general del vehículo

2.1.1 Chasis.

La construcción de los pisos y paredes del modelo fue realizada con polimetilmetacrilato (PMMA) de 3/16" de espesor de acuerdo con el concepto solución seleccionado en el capítulo 2. Los coples empleados para sujetar la flecha del motor al engrane se fabricaron de acrílico transparente de 10mm de espesor. Para la sujeción de los elementos del chasis se utilizaron tornillos tipo Allen M3 cabeza cilíndrica de 10 y 8 mm de longitud.

Los ejes empleados para sujetar las ruedas fueron ejes estriados de 5mm fabricados por LEGO® los cuales se acoplaron a rodamientos *R3 2RS* en las cuatro ruedas. Se colocaron, además, rodamientos *R6 2RS* para sujetar el engrane superior a las ruedas frontales.

Se utilizaron soportes en forma de escuadra fabricados por la marca Pololu® para sujetar los cuatro motores empleados al chasis [13-14], ver Figura 3.

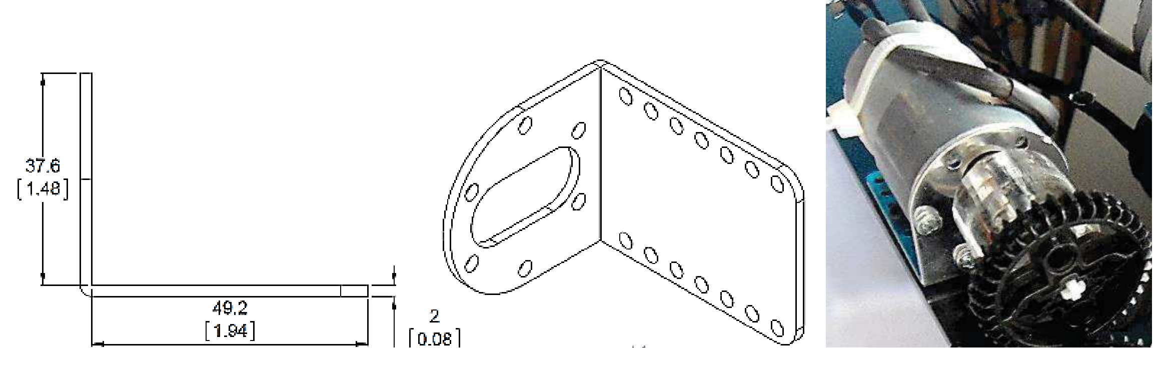


Figura 3. Soporte utilizado para sujetar cada motor al chasis.

Para transmitir el movimiento y potencia del eje de salida de los motores a las ruedas, se optó por recurrir a los engranes cónicos dobles de 36 y 20 dientes fabricados por LEGO Mindstorms® con modulo igual a 1 cuya forma de su cubo (parte central del engrane) permite montarlo sobre un eje estriado.

El arreglo de engranes, para cada lado de la dirección, se conformó por tres engranes de 36 dientes: a) Engrane impulsor, b) Engrane libre y c) Engrane conducido. Los ejes del engrane A y el engrane B se encuentran perpendiculares, sin embargo, al poseer ambos el mismo paso y número de dientes, se tiene una relación de engranaje igual a uno, y un ángulo de paso del cono de 45°. Debido a este arreglo se les denomina *engranes de inglete* y se utilizan para cambiar la dirección de los ejes sin



afectar la velocidad angular. Los ejes de los engranes B y C se encuentran dispuestos de forma paralela y su propósito es transmitir el movimiento hacia la rueda (Figura 4).

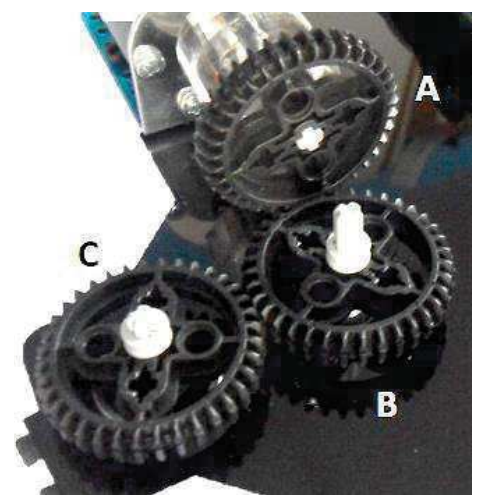


Figura 4. Arreglo de engranes de cada rueda para la dirección. A) Engrane impulsor, B) Engrane libre y C) Engrane conducido.

La transmisión de movimiento en la tracción se efectuó con un par de engranes cónicos dobles de 20 dientes, el engrane A (impulsor) conduce al engrane B existiendo entre ellos un cambio en la dirección del movimiento de 90° ya que sus ejes son perpendiculares. Al igual que en la dirección al tener ambos engranes el mismo número de dientes la relación de engranaje es igual a uno, por tanto, no existe variación en la velocidad angular. Ver Figura 5.

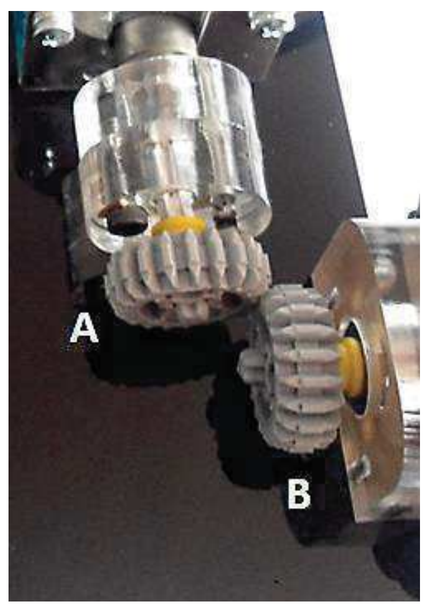


Figura 5. Arreglo de engranes para la tracción. A) Engrane impulsor y B) Engrane conducido.

En la Tabla 1 están las medidas finales del modelo ensamblado, y se observan en la Figura 6.

Tabla 1. Medidas finales del modelo ensamblado.

Medida	Longitud [mm]
Largo	285
Ancho	199
Distancia entre ejes	179

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Distancia entre ruedas	159

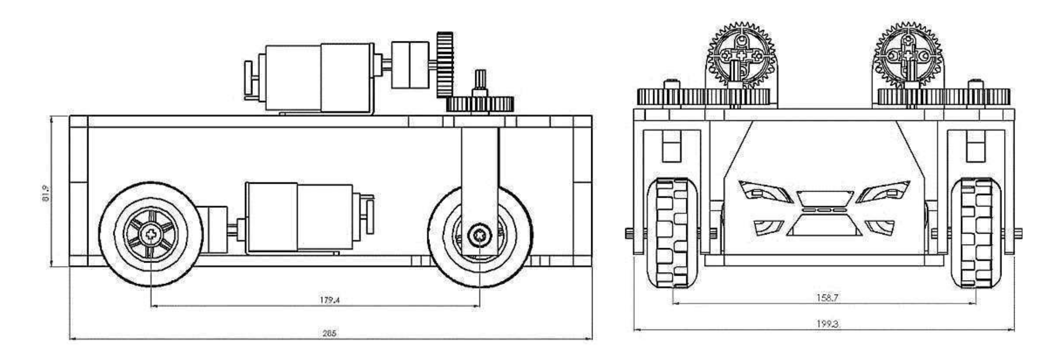


Figura 6. Medidas del vehículo.

Al integrar los dos niveles del chasis y montar sobre ellos los motores con sus respectivos engranes se tiene como resultado el modelo de vehículo armado en su totalidad, ver Figura 7.

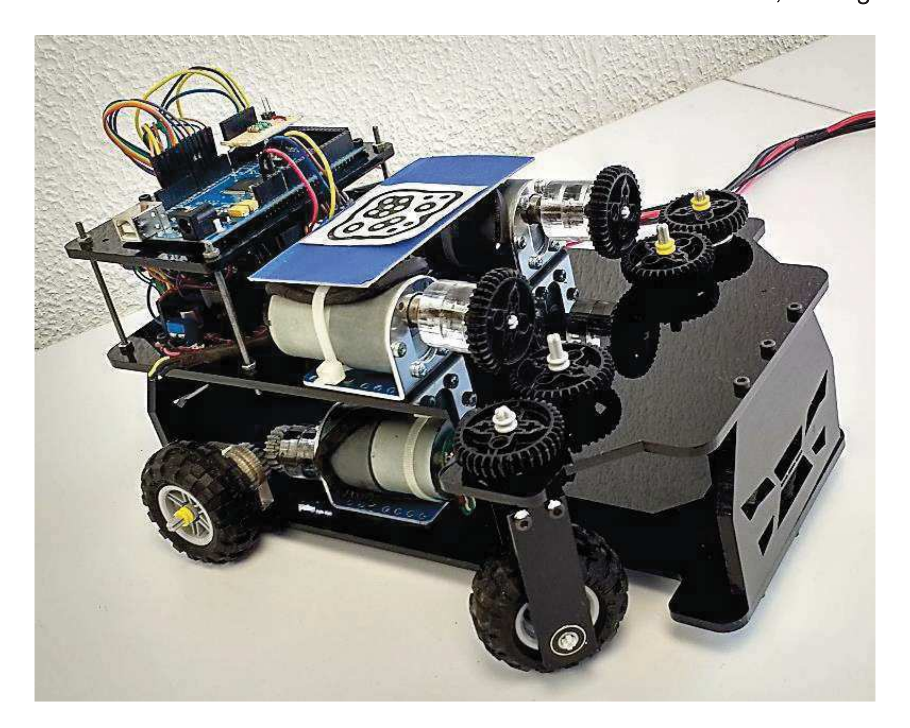


Figura 7. Presentación final del modelo de vehículo ensamblado.

2.1.2 Control de usuario.

El control del vehículo por parte del usuario se implementó a través de un control tipo palanca o *joystick* alámbrico con dos grados de libertad, los cuales permiten ingresar la dirección deseada del modelo moviendo hacia la izquierda o derecha y la velocidad del vehículo deslizando hacia atrás o adelante, permitiendo ambos movimientos de manera simultánea (Figura 8).



1.1.1 Comunicación usuario-vehículo.

Las variables de entrada al sistema (velocidad y dirección) se adquieren a través del *joystick* y se transmiten al microcontrolador por medio de dos señales analógicas provenientes de las resistencias variables de 100 [kΩ] integradas al *joystick* [15]. Dichas señales se transmiten de forma alámbrica a través de un conector de 15 pines (Figura 9), aunque se sigue trabajando para darle señales de forma inalámbrica. Las señales analógicas leídas en el microprocesador fueron convertidas de [0 a 1023] a [-90 a 90] para el caso de la dirección y de [-10 a 10] para el caso de la velocidad. Se debe resaltar que las ecuaciones cinemáticas contemplan valores positivos para virar a la derecha y avanzar y valores negativos para retroceder y virar a la izquierda, siendo cero el estado de reposo.



Figura 8. Control tipo palanca utilizado para controlar el modelo.

1.1.2 Procesador.

El microcontrolador empleado para llevar a cabo las tareas de control de posición y de velocidad de las llantas del vehículo fue el microcontrolador *Arduino Mega*, el cual funciona con un microprocesador ATmega1280, el cual posee 54 entradas/salidas digitales, 16 entradas analógicas, cuatro puertos seriales, una corriente por pin de 40 [mA] y seis pines con capacidad para interrupciones externas, para más información consultar [16]. La razón principal de su elección fue la cantidad de interrupciones externas que se requirieron para realizar la lectura de los encoders de cuadratura de los motores de la dirección. Además, se emplearon salidas digitales (PWM) para controlar la posición y velocidad de cada motor, así como dos entradas analógicas correspondientes a las variables de entrada para el control de posición y de velocidad en las llantas del modelo.

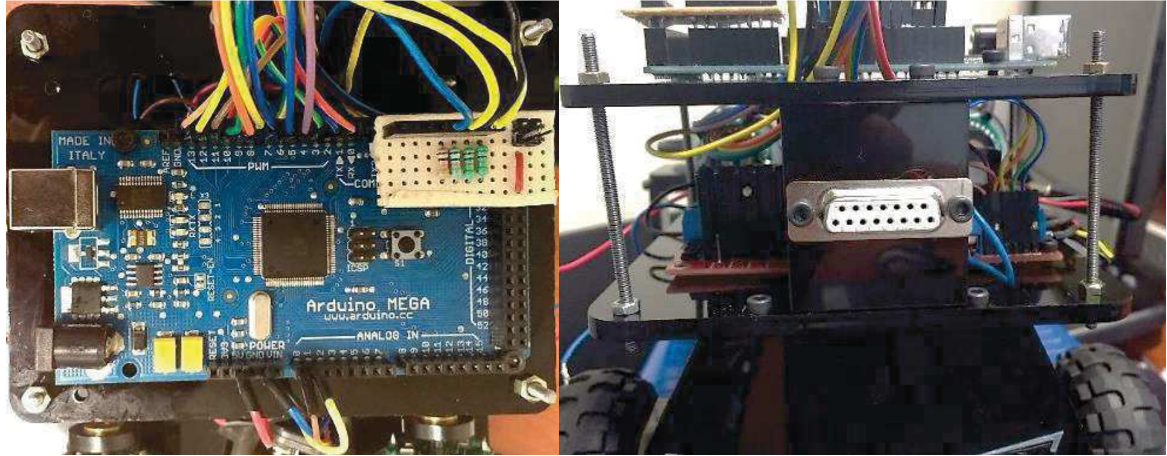


Figura 9. Microcontrolador empleado para controlar el vehículo y su conexión con el control.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



1.1.3 Actuación y sensado.

Los motores utilizados fueron de voltaje de corriente directa con escobillas fabricados por *Pololu®* (Figura 10), relación de engranaje de 131:1 y un *encoder* de cuadratura integrado con una resolución de 8400 pulsos por revolución a la salida de la caja de engranes. Por mencionar otras especificaciones de interés está el voltaje nominal de 12 V, la velocidad a rotor libre de 80 RPM, la corriente a rotor bloqueado de 5 A y el par de torsión de 18 [kg-cm], para más información consultar la página del fabricante [13]. Recordando que este motor fue una restricción de diseño ya que se tenía previamente y se necesitaba para el control de posición con el *encoder* [17].



Figura 10. Motorreductor con encoder modelo 37Dx57L [13].

Una vez efectuada la parametrización del motor DC de forma experimental, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 2):

Tabla 2 Parámetros constantes del motor.

Parámetro	**R** $\left[\Omega\right]$	**Kb** $\left[\frac{N \cdot m}{A}\right]$	**Ka** $\left[\frac{V \cdot s}{rad}\right]$	**J** $\left[kg \cdot m^2\right]$
Valor	2	0.5	1.22	0.06

Donde R es la resistencia de armadura del motor; Kb es una constante que relaciona el par y la corriente; J es el momento de inercia y Ka es una constante que relaciona la fuerza contra electromotriz y la velocidad angular.

1.1.3.1 Control de posición y velocidad [11].

Para poder controlar un sistema que convierte una señal eléctrica de entrada en un movimiento rotacional a la salida, es preciso utilizar un sistema de control en lazo cerrado. La posición del eje del motor es la variable controlada, dicha variable es medida por un sensor (encoder) y comparada con una señal de referencia (posición deseada), como resultado de esa comparación se produce una señal de error que es recibida por la unidad de control quien decide que acción llevar a cabo para que la planta (motor DC) alcance la posición deseada y el error sea cero, ver Figura 11.



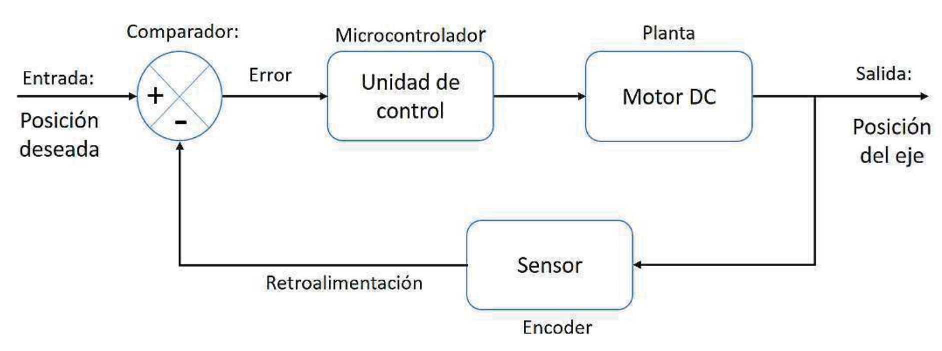


Figura 11. Sistema de control en lazo cerrado para un motor DC.

Para llevar a cabo dicha acción, es preciso conocer la función de transferencia de la planta (motor DC), que se define como la relación entre la transformada de *Laplace* de la salida con respecto a la transformada de Laplace de la entrada, bajo condiciones iniciales nulas, es decir:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} \quad (1)$$

Donde $G(s)$ es la función de transferencia, $\theta(s)$ es la posición angular del eje del motor y $V(s)$ es el voltaje de entrada del motor, en el dominio de *Laplace*. Para obtener la ecuación (1) es necesario realizar un modelo matemático idealizado que describa el comportamiento de un motor de DC con escobillas, el cual se presenta a continuación en la Figura 12:

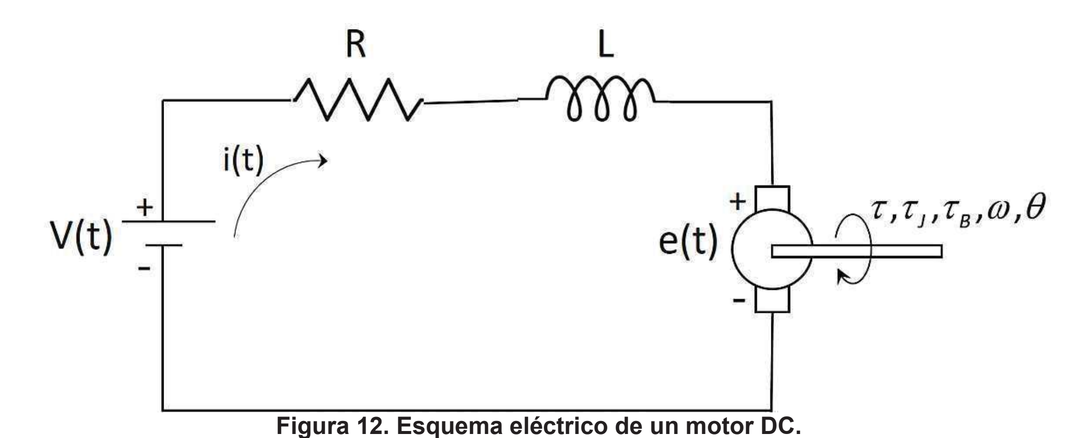


Figura 12. Esquema eléctrico de un motor DC.

Donde V(t) es el voltaje de alimentación del motor, i(t) es la intensidad de corriente, R es la resistencia de la armadura, e(t) es la fuerza contra-electromotriz, L es la inductancia del motor, $\theta(t)$ es la posición angular del eje del motor, $\tau(t)$ es el par del motor, $\omega(t)$ es la velocidad angular del motor, τ_J y τ_B son los pares del momento de inercia y fricción viscosa, respectivamente.

$$V(t) = R \cdot i(t) + L\frac{di}{dt} + k_a \cdot \omega(t) \quad (2)$$

$$k_b \cdot i(t) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B\omega(t) \quad (3)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Las ecuaciones (2) y (3) representan las ecuaciones de equilibrio de la parte mecánica y eléctrica, respectivamente. Donde k_a es la constante de velocidad y k_b es la constante de par motor. Transformando las ecuaciones de equilibrio al dominio de *Laplace* se tiene:

$$\mathrm{V(s)} = \left(\mathrm{R} + \mathrm{L} \cdot \mathrm{s}\right) i(\mathrm{s}) + k_a \cdot \omega(\mathrm{s}) \tag{4}$$

$$i(\mathrm{s}) = \frac{J}{k_b} \cdot s \cdot w(\mathrm{s}) + \frac{B}{k_b} \omega(\mathrm{s}) \tag{5}$$

Sustituyendo (5) en la ecuación (4):

$$\mathrm{V(s)} = \left[\frac{\left(R + L \cdot s\right)\left(J \cdot s + B\right) + k_a \cdot k_b}{k_b} \right] \cdot \omega(\mathrm{s}) \tag{6}$$

Pero debido a que los valores de L y B son mínimos, se desprecian, por lo que la ecuación (6) se reduce a la ecuación (7), además considerando que la velocidad angular es la derivada de la posición angular, es decir, $\omega(\mathrm{s}) = s \cdot \theta(\mathrm{s})$ en *Laplace*:

$$G(\mathrm{s}) = \frac{\theta(\mathrm{s})}{\mathrm{V(s)}} = \frac{\dfrac{k_b}{R \cdot J}}{s\left(s + \dfrac{k_a \cdot k_b}{R \cdot J}\right)} \tag{7}$$

La ecuación (7) representa la función de transferencia propuesta en la ecuación (1), donde los valores de los parámetros $\left(k_a, k_b, R, J\right)$ se determinaron experimentalmente y se muestran en la Tabla 2. Por lo que sustituyendo los valores de los parámetros en la función de transferencia se tiene la siguiente ecuación:

$$G(\mathrm{s}) = \frac{\theta(\mathrm{s})}{\mathrm{V(s)}} = \frac{4.16}{s\left(s + 5.09\right)} \tag{8}$$

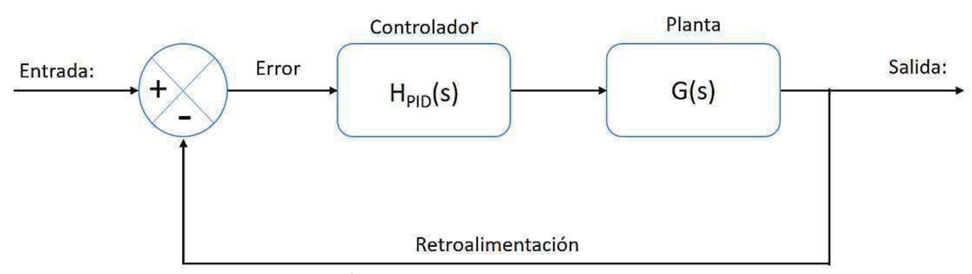


Figura 13. Sistema de control en lazo cerrado.

De acuerdo con la Figura 13, la función de transferencia del sistema de realimentación T(s), está dado por:

$$\mathrm{T(s)} = \frac{H_{PID}(\mathrm{s}) \cdot \mathrm{G(s)}}{1 + H_{PID}(\mathrm{s}) \cdot G(\mathrm{s})} \tag{9}$$

Donde la función de transferencia del controlador PID, se denota por:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$H_{PID}(s) = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s} \tag{10}$$

Al sustituir y desarrollar la función de transferencia del sistema de realimentación se tiene:

$$T(s) = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s^3 + \left(4.16 \cdot K_D + 5.09\right)s^2 + \left(4.16 K_P\right)s + \left(4.16\right)K_I} \tag{11}$$

El polinomio deseado con un porcentaje de sobrepaso ($\%S_p$) de 10, tiempo de asentamiento (t_s) de 1 [s] y un polo adicional (s+50.9), se expresa por la siguiente ecuación:

$$P_{des}(s) = s^3 + 60.89s^2 + 580.55s + 3642.99 \tag{12}$$

Igualando términos semejantes entre la ecuación característica de la función de transferencia T(s) y el polinomio deseado, se obtienen los valores de las ganancias para el controlador PID:

$$K_P = 139.5 \qquad K_I = 875.7 \qquad K_D = 13.4$$

En la Figura 14 se muestra una simulación de la respuesta del sistema al aplicarse el controlador PID teniendo como señal de excitación un escalón unitario.

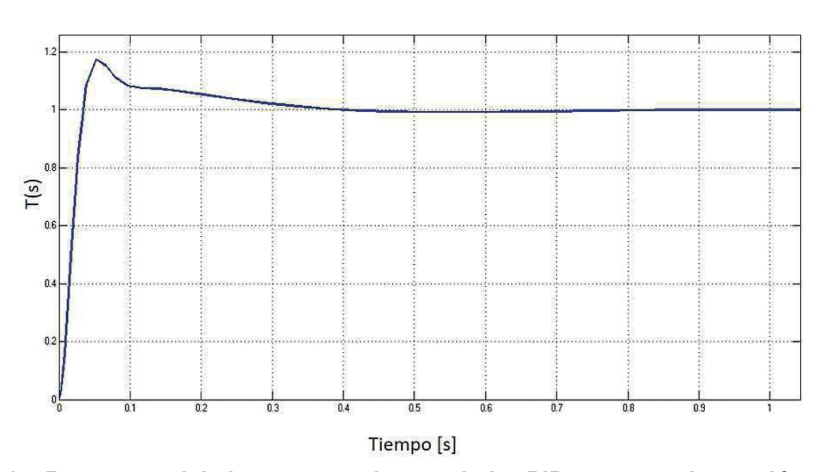


Figura 14. Respuesta del sistema con el controlador PID con entrada escalón unitario.

La selección del periodo de muestreo de acuerdo con el Teorema de *Shannon* o criterio de *Nyquist* debe ser por lo menos el doble de la frecuencia más alta en la señal muestreada, esto con la finalidad de no obtener una imagen o reconstrucción falsa de la señal medida. Sin embargo, dicho periodo no puede ser reducido a su valor mínimo debido a otros factores como la velocidad de procesamiento y el tipo de actuador empleado. Por ese motivo se utiliza una aproximación y se mide el ancho de banda como la frecuencia cuando la respuesta de la planta en lazo abierto se encuentra en -7.5 [dB] y se incrementa cien veces. De acuerdo con el diagrama de Bode de la Figura 15, la magnitud de la frecuencia cuando la respuesta se encuentra en -7.5 [dB] es igual a 1.82 [rad/s].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



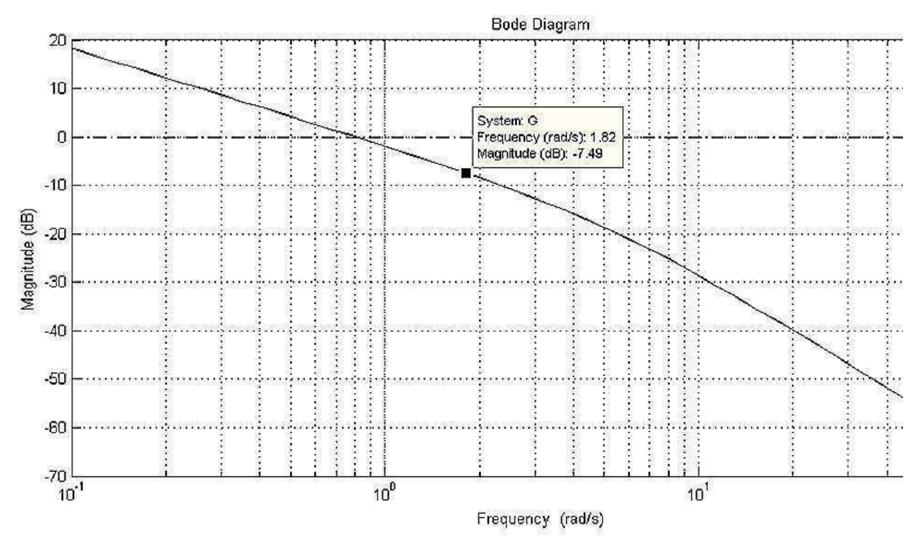


Figura 15. Respuesta en frecuencia de la planta en lazo abierto.

De esta manera la frecuencia y periodo de muestreo se obtienen de la siguiente manera:

$$F_m = \frac{100 \cdot (\mathrm{F}_{anchodebanda})}{2\pi} \frac{100 \cdot 1.82[rad/s]}{2\pi} = 28.96[\mathrm{Hz}] \quad (13)$$

$$\mathrm{T}_m = \frac{1}{F_m} = \frac{1}{28.96} = 0.034[\mathrm{s}] \quad (14)$$

El controlador PID para la posición del motor se implementó de forma digital utilizando el microcontrolador Arduino Mega.

1.2 Algoritmos para la coordinación de las llantas frontales direccionables y llantas traseras de tracción.

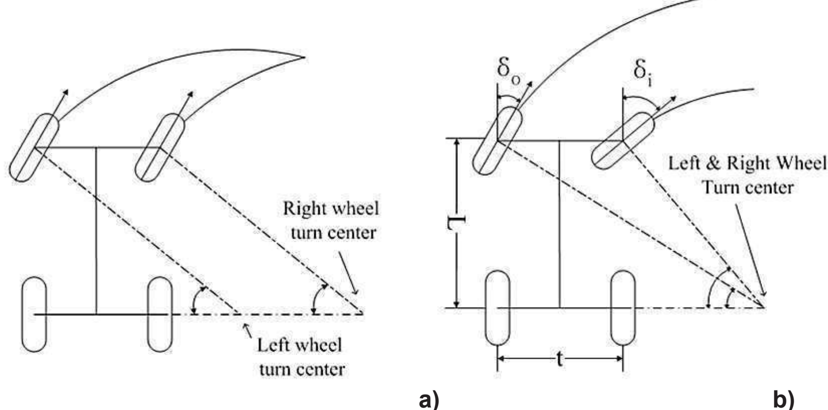
1.2.1 Principio de la dirección Ackerman [18].

El principio de la dirección Ackerman es la relación entre la rueda frontal interior y la rueda frontal exterior de un vehículo al tomar una curva. Para formar la geometría correcta, los brazos de direccionamiento se desplazan para que la rueda interior gire un mayor ángulo que la rueda exterior. El concepto es que los ejes perpendiculares de las cuatro ruedas coincidan alrededor de un punto en común denominado Centro Instantáneo de Rotación (CIR) durante una vuelta. Si los ejes no coinciden en el mismo punto, las ruedas frontales experimentarán deslizamiento.

En la Figura 16 a se ilustra un esquema de dirección paralela, en él, las ruedas delanteras giran el mismo ángulo, lo que trae como consecuencia que los ejes de las ruedas frontales no coincidan con la prolongación del eje trasero, es decir, no convergen en un sólo centro instantáneo de rotación y las trayectorias de ambas ruedas no son concéntricas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





a) **b)**

Figura 16. a) Sistema de dirección paralelo; b) Sistema de dirección Ackerman.

La Figura 16 b presenta la configuración Ackerman, como se puede notar los ejes perpendiculares a las ruedas frontales coinciden con la prolongación del eje trasero en un solo CIR, por tanto, los radios de giro de cada rueda serán concéntricos en todo momento.

El modelo estándar para calcular los ángulos interior y exterior está dado por:

$$\cot\delta_o - \cot\delta_i = \frac{t}{L} \quad (15)$$

Donde δ_0 corresponde al ángulo de la rueda exterior, δ_i al ángulo de la rueda interior, t es el ancho entre ruedas y L la distancia entre ejes trasero y delantero. Sin embargo, la Ecuación 15 no establece una relación entre el ángulo del automóvil y el ángulo de cada rueda, sino únicamente el ángulo de viraje para cada rueda respecto al centro instantáneo de rotación.

En [7] se presenta la formulación cinemática de la dirección Ackerman en la cual los ángulos de dirección θ_i y θ_o son determinados en función del ángulo de giro del automóvil θ_{sa} (rueda virtual direccionable) así como del ancho entre ruedas *d* y la distancia entre ejes *L*, lo anterior está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\cot\theta_i = \cot\theta_{sa} - \frac{d}{2L} \quad (16)$$

$$\cot\theta_o = \cot\theta_{sa} + \frac{d}{2L} \quad (17)$$

Despejando θ_i y θ_o de las ecuaciones (16) y (17), se tiene:

$$\theta_i = a\tan\left(\frac{2L\tan\theta_{sa}}{2L - d\tan\theta_{sa}}\right) \quad (18)$$

$$\theta_o = a\tan\left(\frac{2L\tan\theta_{sa}}{2L + d\tan\theta_{sa}}\right) \quad (19)$$

De esta forma las ecuaciones 18 y 19 establecen el ángulo que deben girar las ruedas interior y exterior de acuerdo con el ángulo de giro del automóvil y de su geometría.

La velocidad de las ruedas traseras que proporcionan la tracción viene dado por el radio de giro el cual varía según la orientación del vehículo así como de la velocidad angular deseada para el vehículo.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 14, pp.159-179.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$R = \frac{L}{\tan\theta_{sa}} \tag{20}$$

$$\omega_v = \frac{V_d}{R} \tag{21}$$

Donde ω_v es la velocidad angular del vehículo que está en función de la velocidad lineal deseada V_d así como del radio de giro R, sustituyendo (20) y (21) en las siguientes ecuaciones:

$$V_i = \omega_v \left(R - \frac{d}{2} \right) \tag{22}$$

$$V_o = \omega_v \left(R + \frac{d}{2} \right) \tag{23}$$

Se obtienen las ecuaciones que modelan la velocidad de cada una de las ruedas, la ecuación (22) corresponde a la velocidad de la rueda izquierda y la ecuación (23) a la rueda derecha, considerando una vista superior del modelo.

Usualmente este sistema de dirección es implementado de manera mecánica, lo cual implica limitaciones en cuanto a los ángulos de viraje de cada rueda. Por lo tanto, partiendo de la Figura 17, los ángulos de viraje interior y exterior vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\tan\theta_i = \frac{L}{R - \frac{d}{2}} \tag{24}$$

$$\tan\theta_o = \frac{L}{R + \frac{d}{2}} \tag{25}$$

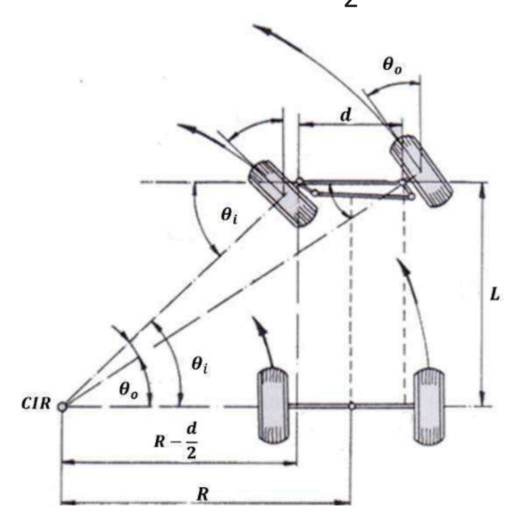


Figura 17. Esquema de un vehículo con dirección Ackerman.

Donde R representa el radio de giro del vehículo, teniendo en cuenta que el radio de giro mínimo suele ser aproximadamente el doble de la distancia entre ejes, es decir $R = 2L$, se tiene de las ecuaciones (24) y (25):

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\tan\theta_i = \frac{2L}{2\left(2L - \frac{d}{2}\right)} = \frac{2L}{4L - d} \quad (26)$$

$$\tan\theta_o = \frac{2L}{2\left(2L + \frac{d}{2}\right)} = \frac{2L}{4L + d} \quad (27)$$

Las ecuaciones (26) y (27) permiten conocer el ángulo de viraje máximo en un vehículo con dirección Ackerman, lo anterior es de gran utilidad ya que permite implementar dicha dirección sin depender de un mecanismo y se puede sustituir por motores eléctricos con control de posición.

1.2.2 Principio de la dirección independiente [6].

Para introducir al modelo de la direccionabilidad independiente, se debe describir la postura del vehículo, se usan las descripciones para la robótica móvil, considerando que se desplazará en un espacio de trabajo plano.

Se tiene un sistema de referencia inercial (X, Y, 0) de dos dimensiones en el plano. A su vez, un sistema de referencia móvil (X_1, Y_1, 0) con origen en el punto P y que se encuentra alineado con el eje longitudinal del vehículo, describe la posición del modelo con respecto al sistema de referencia inercial por medio del ángulo φ. Un sistema de referencia móvil (X_2, Y_2, 0) representa la posición de la llanta virtual (localizada en el punto P) respecto al sistema de referencia móvil (X_1, Y_1, 0) mediante el ángulo θ_{sa}, obsérvese Figura 18.

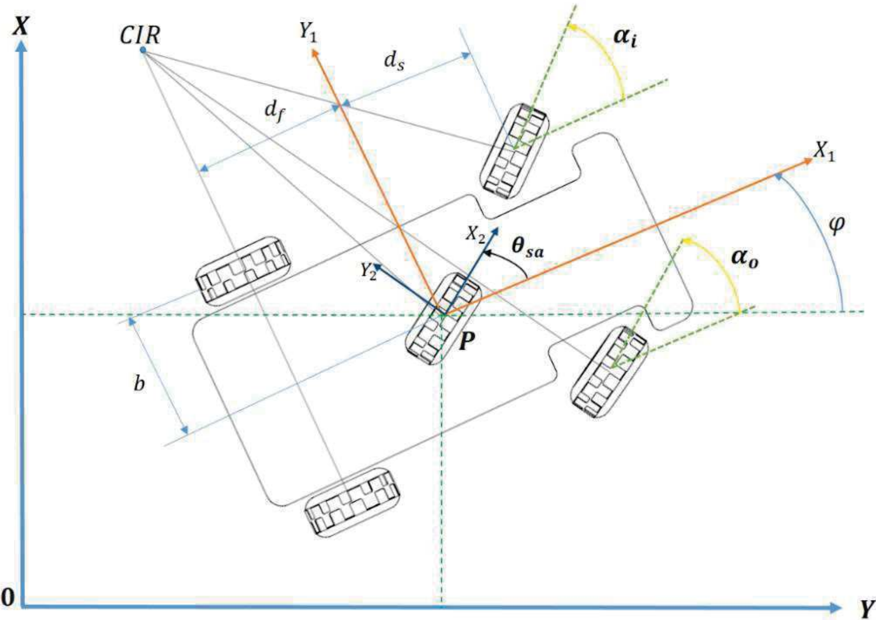


Figura 18. Representación esquemática de un vehículo con llanta virtual. Modificado de [6].

Cabe mencionar que la llanta virtual no posee masa ni motor [6], por lo que funge como elemento de control sobre el vehículo. Los ángulos α_i y α_o representan el ángulo de las ruedas independientes en su dirección, dichos ángulos se calculan por medio de las ecuaciones 28 y 29:

$$\alpha_i = a\tan 2\left[-(\mathrm{df}-\mathrm{ds})\cdot \mathrm{sen}(\theta_{sa}),\left[-b\cdot sen(\theta_{sa})-(\mathrm{df}-\mathrm{dv})\cdot\cos(\theta_{sa})\right]\right][\mathrm{rad}] \quad (28)$$

$$\alpha_o = a\tan 2\left[-(\mathrm{df}-\mathrm{ds})\cdot \mathrm{sen}(\theta_{sa}),\left[b\cdot sen(\theta_{sa})-(\mathrm{df}-\mathrm{dv})\cdot\cos(\theta_{sa})\right]\right][\mathrm{rad}] \quad (29)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Donde *dv* representa la distancia del punto P al eje de la llanta virtual, es decir, dv=0. La distancia del punto P al eje de las llantas direccionables se representa con *ds*. A su vez, la variable *df* muestra la distancia del punto P al eje de las llantas traseras, la cual tomará un valor negativo dada la ubicación del sistema de referencia (X_1, Y_1, 0). La variable *b* representa la distancia del punto P a las llantas traseras a lo largo del eje Y_1. Las variables mencionadas anteriormente adquieren un valor constante el cual se toma de las dimensiones del vehículo.

Las ecuaciones 30 y 31 definen la velocidad angular de las llantas traseras encargadas de proporcionar la tracción del vehículo y cabe resaltar que se encuentran en función del ángulo de la llanta virtual θ_{sa}, así como del valor deseado de velocidad del vehículo ω_{sa} y del radio de las ruedas *r* utilizadas en el modelo.

$$V_i = \frac{\left[(dv-df)\cdot\cos(\theta_{sa})+\mathrm{b}\cdot\mathrm{sen}(\theta_{sa})\right]\left(r\cdot\omega_{sa}\right)}{r\cdot(\mathrm{dv}-\mathrm{df})} \quad \text{[rad/s]} \tag{30}$$

$$V_o = \frac{\left[(dv-df)\cdot\cos(\theta_{sa})-\mathrm{b}\cdot\mathrm{sen}(\theta_{sa})\right]\left(r\cdot\omega_{sa}\right)}{r\cdot(\mathrm{dv}-\mathrm{df})} \quad \text{[rad/s]} \tag{31}$$

De esta manera es posible determinar lo valores de los parámetros requeridos para poder resolver las ecuaciones (18), (19) y de (28) a (31) formuladas previamente.

Tabla 3. Parámetros del modelo para ecuaciones cinemáticas.

Parámetro	Descripción	Valor [m]
dv	Distancia del punto central del vehículo al eje de la llanta virtual	0
ds	Distancia del punto central del vehículo al eje de las ruedas direccionables	0.0815
df	Distancia del punto central del vehículo al eje de las ruedas traseras	-0.098
b	Distancia del punto central del vehículo a las llantas traseras (simétrico)	0.080
r	Radio de las llantas	0.028
L	Distancia entre ejes de la dirección y tracción (longitud)	0.179
d	Distancia entre ruedas (ancho)	0.159

1.3 Cálculo de los parámetros de la dirección independiente.

Se requirió programar las ecuaciones que calculan el ángulo de las llantas frontales a partir del ángulo deseado para la llanta virtual, así como las velocidades de las llantas traseras a través de la velocidad deseada para la llanta virtual. De esta forma, retomando los parámetros de la Tabla 3, se programaron las ecuaciones (28-31) en el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino.

Donde av es el ángulo deseado para la llanta virtual en [rad] y PotRef2 es el valor de la velocidad deseada para la llanta virtual en [rad/s], cuyo valor proviene de los potenciómetros instalados en el *joystick* del conductor. Posteriormente, los valores calculados de los ángulos se toman como referencia para poder llevar a cabo el sistema de control PID.

En la Tabla 4 se presentan los valores de los ángulos de cada rueda cuando el valor de entrada o ángulo de la llanta virtual va de 90° a -90° que es el ángulo límite, note como el ángulo de la rueda interior siempre es mayor que el ángulo de la rueda exterior, de acuerdo con el lado de giro.

Tabla 4. Valores de los ángulos de cada rueda utilizando el algoritmo de la llanta virtual.

	Ángulo de la llanta virtual [°]	Ángulo de la llanta izquierda [°]	Ángulo de la llanta derecha [°]
Giro hacia la	90	66.5	113.5

ISBN: 978-607-9394-14-1.



derecha	45	45.6	83.6
Giro hacia la izquierda	-45	-83.6	-45.6
	-90	-113.5	-66.5

1.4 Cálculo de los parámetros de la dirección Ackerman.

Las ecuaciones que calculan el valor de los ángulos de las ruedas frontales, así como de las velocidades de las llantas traseras para la dirección Ackerman, de acuerdo con las ecuaciones (18-23), se muestran en la Figura 17.

En la Tabla 5 se pueden observar los ángulos máximos e intermedios de cada rueda utilizando el algoritmo de la dirección Ackerman. Cabe destacar que, al girar el vehículo hacia la derecha, el ángulo de la rueda derecha es mayor al ángulo de la rueda izquierda y viceversa.

Tabla 5. Ángulos de las ruedas frontales con la dirección Ackerman.

	Ángulo del vehículo[°]	**Ángulo de la llanta izquierda [°]**	**Ángulo de la llanta derecha [°]**
Giro hacia la derecha	26	22.2	32.7
	13	11.8	14.4
Giro hacia la izquierda	-13	-14.4	-11.8
	-26	-32.7	-22.2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



1.5 Adquisición de datos para la graficación de la posición del vehículo.

Se utilizó un sistema de visión como herramienta para captar las trayectorias realizadas por el vehículo, en cada prueba a la que fue sometido, es decir, con este sistema de visión se almacenaron las coordenadas (x, y) para su posterior análisis. Una cámara de video de 1920x1080 pixeles, fue instalada a una altura de 1.3 [m] del piso, que fue donde se efectuaron las pruebas. Dicha cámara enfocó un área de trabajo de 940x710 [mm] en la cual el vehículo se desplazó. Se empleó un programa de visión artificial llamado *reacTIVision®* [19], el cual reconoce un símbolo *fiducial* a partir del video de la cámara. Se colocó uno de estos símboles en la parte superior del vehículo para guardar las trayectorias del robot.

En la computadora es necesario un programa que decodifique la información del *reacTIVision*, el cual es llamado *cliente TUIO*, que en este caso fue la plataforma de animación *Processing®*, la cual se encargó de decodificar la posición en el plano XY. Como paso final, los datos de las coordenadas grabadas por la cámara se exportaron en un archivo “txt” para su posterior graficación.

2. Experimentación con el modelo

Para la experimentación se desplazó el vehículo con la dirección a su máximo grado de giro hacia la izquierda y hacia la derecha intentando virar 180° tal como lo esquematiza la Figura 19. Se realizó la misma prueba para el modo de dirección con llanta virtual y la dirección Ackerman para poder determinar la capacidad de giro del vehículo.

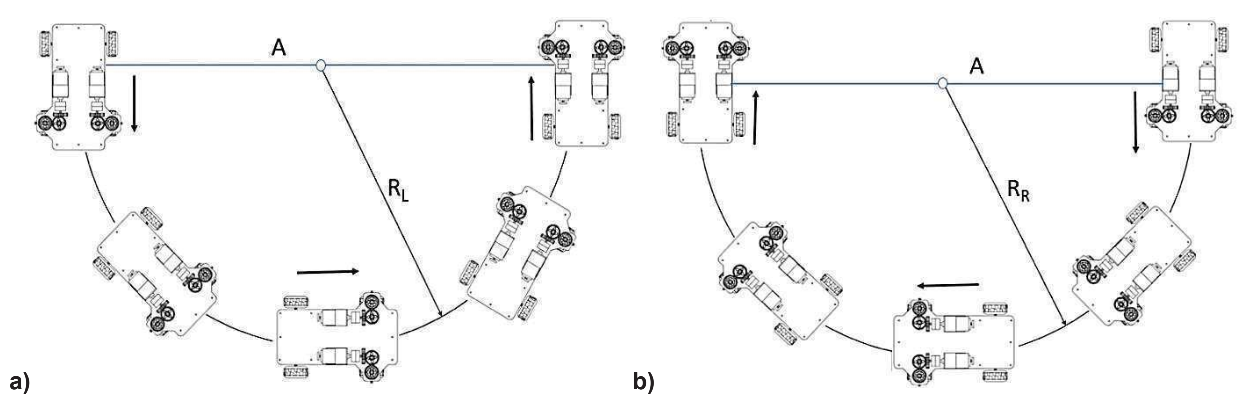


Figura 19. Trayectoria propuesta para la prueba de radio de giro mínimo.
a) Giro de vehículo hacia la izquierda, b) Giro de vehículo hacia la derecha

El sistema de referencia de la imagen de video captada se localizó en la esquina superior izquierda para todas las pruebas efectuadas. A continuación, se muestran imágenes del vehículo funcionando con dirección tipo Ackerman (Figura 20).

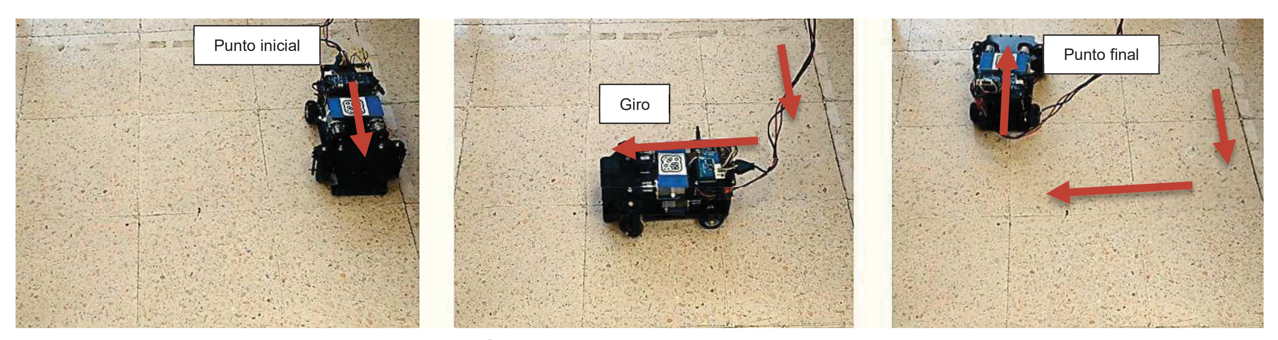


Figura 20. Modelo con dirección Ackerman en prueba de radio de giro hacia la derecha.

En la Figura 21 se muestran imágenes de una de las pruebas del vehículo con dirección independiente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



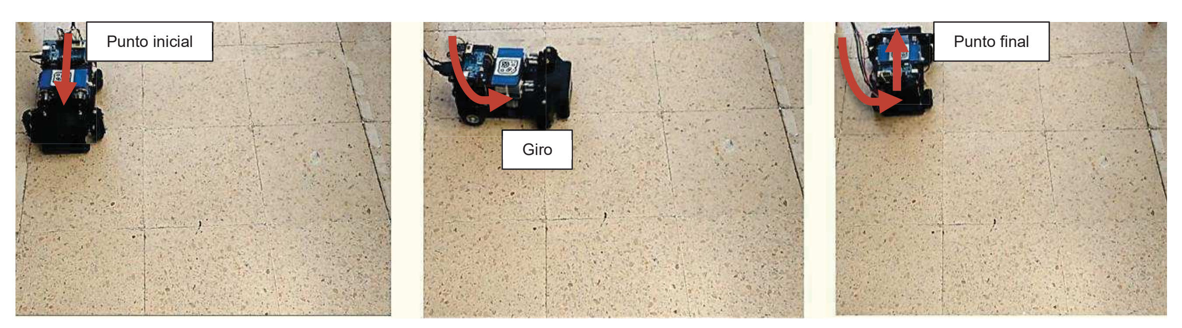
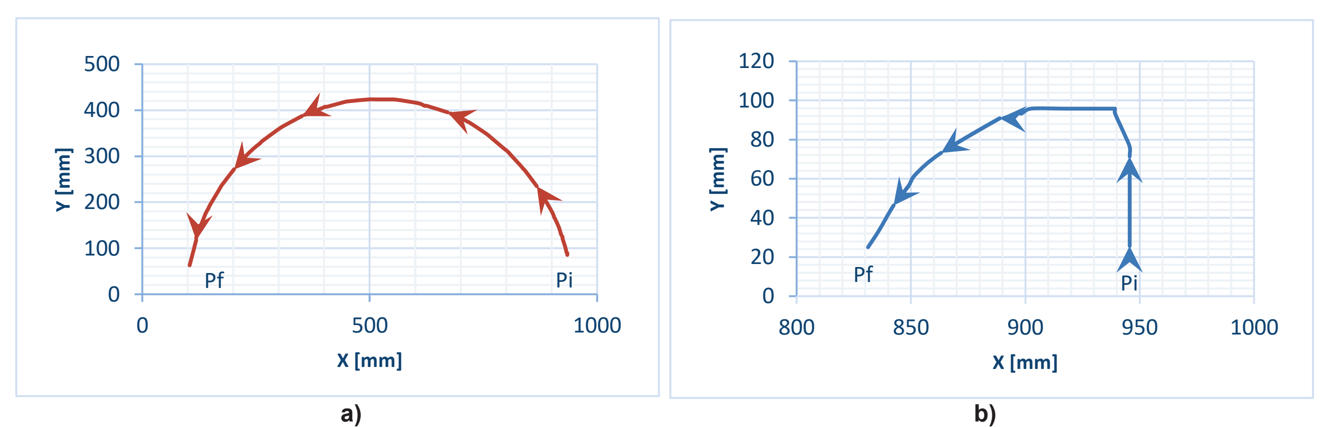


Figura 21. Modelo con dirección Independiente en prueba de radio de giro hacia la izquierda.

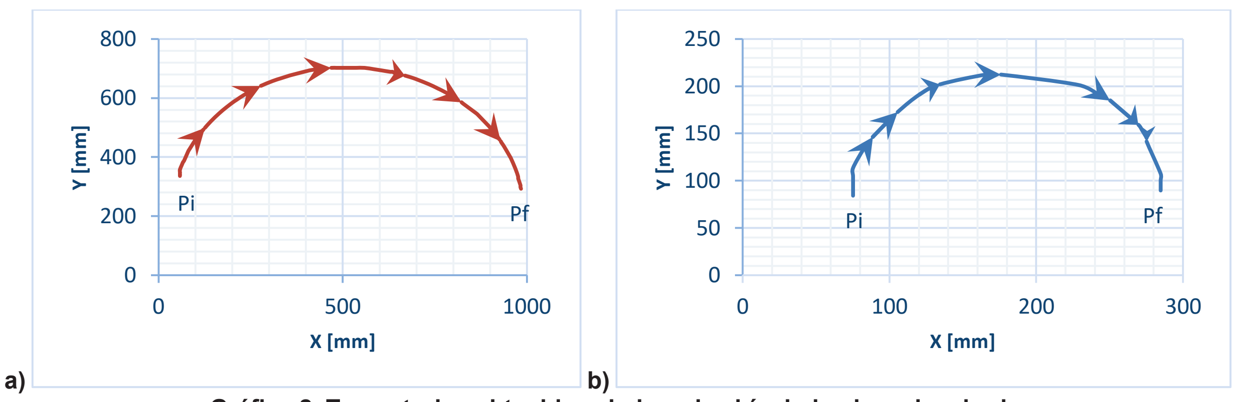
Se realizaron cinco réplicas para cada modo de dirección. En las gráficas de los experimentos se denota el punto inicial (Pi) y el punto final (Pf) de las trayectorias efectuadas por el vehículo. En la Gráfica 1 se ilustra un ejemplo de las trayectorias del vehículo al girar hacia la derecha para cada modo de dirección, se observa la amplitud (A) de cada curva y cabe resaltar que para la dirección Ackerman la magnitud es aproximadamente siete veces más grande que para la dirección independiente.



a) b)

Gráfica 1. Trayectorias obtenidas al girar el vehículo 180° hacia la derecha.
a) Dirección Ackerman, b) Dirección Independiente.

En la Gráfica 2 se puede observar unas de las trayectorias del vehículo al girar hacia su izquierda en una vuelta de 180°, a diferencia de la gráfica anterior, la amplitud de la curva de la dirección Ackerman es aproximadamente cinco veces más grande que la amplitud de la curva de la dirección independiente.



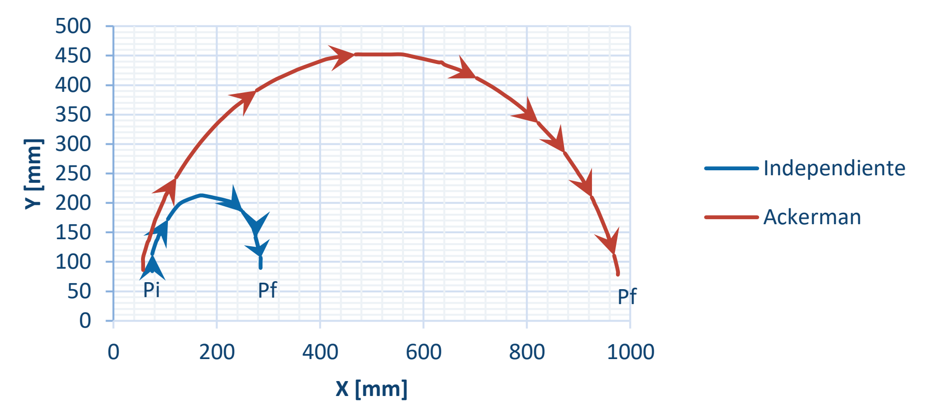
a) b)

Gráfica 2. Trayectorias obtenidas al girar el vehículo hacia su izquierda.
a) Dirección Ackerman, b) Dirección Independiente.

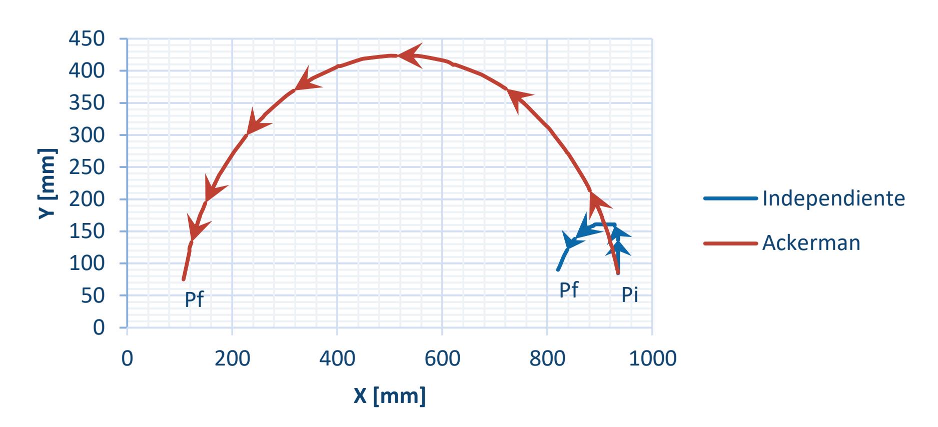
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Las gráficas 3 y 4 presentan de manera comparativa la diferencia entre las amplitudes de las curvas trazadas por el vehículo para cada modo de dirección. Los valores exactos de los radios de giro se obtuvieron como el promedio del total de iteraciones realizadas para cada lado de giro.



Gráfica 3. Trayectorias del vehículo al virar hacia su derecha.



Gráfica 4. Trayectorias del vehículo al virar hacia su izquierda.

En los resultados se observaron diferencias con las trayectorias hacia la derecha con respecto a las trayectorias hacia la derecha. Una de las posibles causas es que las llantas traseras derraparon al dar vuelta a pesar de que las ecuaciones correspondientes contemplan un giro hacia atrás. Se puede explicar también a que el radio de giro es más pequeño y la resolución del controlador de velocidad es bajo, ya que se empleó la modulación por ancho de pulso y los valores están limitados entre 0 y 255 unidades. En las ecuaciones de las llantas traseras, cuando la velocidad es baja, los valores poseen puntos decimales que no se pueden obtener con dichos valores.

En la prueba de la experimentación, el vehículo con la dirección Independiente obtuvo un radio de giro 4.8 veces menor al girar a la izquierda y 6.4 veces menor al girar hacia la derecha que los obtenidos con la dirección Ackerman.

Los experimentos se desarrollaron a una velocidad baja que estuvo limitada por los motores (restricción de diseño), sin embargo, queda pendiente probar si la velocidad es un factor que afecte la maniobrabilidad con el direccionamiento independiente, se piensa que, a mayor velocidad, un ángulo de giro sería riesgoso para el vehículo, es decir que podría volcarse a grandes velocidades o bien, dañar a las llantas direccionables.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Conclusiones

En el presente trabajo se logró diseñar e implementar un modelo de vehículo con dos llantas traseras que proporcionaron la tracción y dos llantas frontales direccionables. Durante cada una de las 160 pruebas ejecutadas no se reportó falla mecánica o electrónica. Además, fue posible establecer dos configuraciones de dirección (Ackerman e Independiente) en el mismo modelo lo que permitió una comparación más confiable.

Se logró la implementación de los algoritmos de control, tanto de la llanta virtual como de la dirección Ackerman en el modelo, mediante un microcontrolador que por sí mismo calculó los parámetros para controlar las posiciones de las llantas frontales, así como las velocidades angulares de las llantas traseras en tiempo real. Las pruebas con el vehículo permitieron observar el comportamiento de dos configuraciones de direccionamiento donde la dirección independiente disminuye el radio de giro y, en consecuencia, disminuye el espacio sobre del cual puede dar vueltas. Esto indica que la dirección independiente posee una maniobrabilidad diferente con respecto a la dirección Ackerman. Queda como trabajo pendiente realizar un protocolo de investigación para comparar la eficiencia de la maniobrabilidad.

Al modelo le falta agregarle comunicación inalámbrica para mayor movilidad e independencia, así como un sistema de grabación de datos internos como los ángulos generados por el Encoder durante las trayectorias.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la Universidad Nacional Autónoma de México. Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME con clave PE110618.

Referencias

[1] Zhang, Z., Zhang, X., and Pan, H., "*A novel steering system for a Space-Saving 4WS4WD electric Vehicle: Design, Modeling and road tests*", IEEE ASME Transactions on Intelligent Transportations Systems, 2016.
[2] Tin Lun Lam and Yangsheng Xu, "*Omnidirectional steering interface and control for a four-wheel independent steering vehicle*", IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2010.
[3] Chicurel-Uziel, E. A 180° steering interval mechanism. Mechanism and Machine Theory, vol. 34, pp 421-436, 1999.
[4] Sekhavat, S.; Hermosillo, J., *Cycab bisteerable cars a new family of differentially flat systems*. Advanced Robotics, Volume 16, Number 5, pp. 445-462(18), 2002
[5] Mauder, M. *Robust tracking control of nonholonomic dynamic systems with application to the bi-steerable mobile robot*. Automatica 44, pp 2588–2592, 2008
[6] Diaz-Hernandez, O., "*Experimentación con una configuración de robot móvil de llantas frontales independientes en su direccionabilidad*", Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, 2010.
[7] González, U, "*Prototipo experimental de un vehículo que evade colisiones a través de los sistemas Steer by wire y Differential drive*", Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, 2011.
[8] Ulrich, K., Eppinger, S. "*Diseño y desarrollo de productos*", 5a ed., Ed. Mc Graw Hill, México, 2013.
[9] Gopalakrishnan, B., Tirunellayi, S. *Design and development of an autonomous mobile smart vehicle: a mechatronics application. Mechatronics*, 14, pp 491-514, 2004
[10] Montgomery, D. "*Diseño y análisis de experimentos*", 2a ed., Ed. Limusa Wiley, México, 2004.
[11] Bolton, W. "*Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*", 4a ed., Ed. Alfaomega, México, 2010.
[12] Mott, R. "*Diseño de elementos de máquinas*", 4a ed., Ed. Pearson Educación, México, 2006.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[13] Pololu. Robotics & Electronics. 131:1 *Metal Gearmotor 37Dx73Lmm with 64 CPR Encoder*. Fecha de consulta: abril de 2017. Disponible en: < https://www.pololu.com/product/2827>

[14] Pololu. Robotics & Electronics. *Pololu Stamped Aluminum L-Bracket Pair for 37D mm Metal Gearmotors.* Fecha de consulta: abril de 2017. Disponible en: < https://www.pololu.com/product/1084>

[15] Duarte, R. *Joysticks & microcontrollers*. Fecha de consulta: Abril de 2017. Disponible en: < http://www.rahji.com/wordpress/2007/09/19/joysticks/>

[16] Arduino. Arduino Mega 1280. Fecha de consulta: enero de 2017. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>

[17] West instruments de México. *Manual de aplicación de encoders*. Fecha de consulta: Abril de 2017. Disponible en: < https://www.acomee.com.mx/ENCODERS.pdf>

[18] Min, W., Jun S., Bong, S. Man, H. *The performance of independent wheels steering vehicle(4WS) applied Ackerman geometry.* International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Seoul, South Korea 2008.

[19] ReacTIVision. *ReacTIVision files*. Fecha de consulta: Abril de 2017. Disponible en: < http://reactivision.sourceforge.net/>

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 15, pp.180-191.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Evaluación de la Estabilidad Tip-Over en un Manipulador Móvil cuando existen Fuerzas y Momentos Externos en el Efector Final

Martínez Sánchez Noé Alfredo[1], Souza Jiménez José Antonio [2], González Villela Víctor Javier [1], y García Hernández Juan Carlos[2]

[1]*Universidad Nacional Autónoma de México, A.v Universidad #3000, Ciudad de México, C.P. 04510, México D.F.*
[2]*Universidad Nacional Autónoma de México FES Aragón, Avenida Hacienda de Rancho Seco S/N, Impulsora Popular Avicola, C.P. 57130 Nezahualcóyotl, Estado de México.*

Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación de la estabilidad Tip-Over en un manipulador móvil cuando en su efector final se presentan fuerzas y momentos externos. El manipulador móvil está compuesto por un brazo de 3 grados de libertad y una plataforma móvil diferencial, para medir la estabilidad dinámica se utiliza el criterio MNGR (Mean Normal Ground Reactions). Se definen tres casos de estudio: el efector final lleva una carga mientras el brazo se alarga y la plataforma móvil permanece fija; se aplica un momento incremental al efector final cuando el robot adopta una postura estática estable; el manipulador móvil realiza una trayectoria en donde la plataforma móvil avanza hacia enfrente mientras que el manipulador se alarga llevando una carga. Los resultados de las simulaciones numéricas permiten ver la influencia de las fuerzas y momentos externos aplicados a un manipulador móvil en la estabilidad. En el primer caso: una carga afecta la estabilidad si el efector final lleva una carga y este se alarga; en el segundo caso: aunque el manipulador permanezca estable estáticamente, un momento externo incremental, reduce la estabilidad; en el tercer caso: las fuerzas dinámicas en el movimiento del manipulador móvil más una fuerza externa hacen que la estabilidad disminuya considerablemente llevando al sistema a una situación de vuelco.

Palabras clave: Manipulador móvil, estabilidad, criterio MNGR, fuerzas y momentos externos.

1. Introducción

Un robot manipulador móvil con llantas está compuesto de un brazo manipulador montado sobre una plataforma móvil con llantas. Las aplicaciones de estos sistemas son diversas, por ejemplo: en la exploración espacial [1], limpieza de desechos tóxicos, vehículos forestales [2, 3], vigilancia, desmantelamiento de bombas, lucha contra incendios [4], industria [5], atención a la salud [6, 7], operaciones militares [8], tareas de mantenimiento [9], etc. Uno de los aspectos a considerar en estos robots es el riesgo de vuelco, el cual se da cuando el vehículo tiende a rotar dando como resultado una reducción de los puntos de contacto con el suelo. Entre las causas por las que un manipulador móvil sufre un vuelco se encuentran: la manipulación de cargas pesadas, las fuerzas y momentos en el efector final, el trabajo en ambientes desconocidos, el centro de masa muy alto o muy alejado del centro de la base de soporte, perturbaciones externas, condiciones irregulares del terreno, basculamiento del sistema, operación a altas velocidades y aceleraciones, etc. [3, 10-12]. Las consecuencias que tiene el vuelco de un manipulador móvil son entre otras: peligro para el operador humano, pérdida de dinero, daño al robot, pérdida de vidas, misiones fallidas.

Se han presentado diversas medidas para la estabilidad en robots con patas [13], sin embargo, a continuación se comentaran las principales medidas de estabilidad en manipuladores móviles. ZMP (Zero-Moment Point) en [14] toman el criterio de estabilidad ZMP ampliamente conocido en robots con patas y proponen los conceptos de grado de estabilidad y región valida estable en manipuladores móviles. El ZMP es un punto en el piso donde el momento resultante de la gravedad, la fuerza inercial del manipulador móvil y la fuerza externa es cero, además se genera una zona llamada región estable la cual está formada con los puntos de contacto del polígono de apoyo, si el ZMP está dentro de esta zona el manipulador móvil es estable. El grado de estabilidad es una medida que relaciona la posición ZMP y la región estable, la región valida estable es una zona valida delimitada



por la distancia mínima que el ZMP puede estar cerca del polígono de apoyo. En [15] amplían el criterio ZMP adicionando los efectos inerciales en el cálculo. Criterio de Energía, en [16] presentan un método de monitoreo del vuelco en un manipulador móvil, el método es una modificación de la medida de estabilidad propuesta por [10], ellos propusieron el uso de trabajo mínimo requerido para que un vehículo sufra un vuelco, la aproximación está basada en la energía requerida para colocar el centro de masa en un plano llamado plano de equilibrio tal que el momento ejercido en el sistema sea mínimo. Ghasempoor y Sepehri extienden la medida para incluir cargas inerciales y externas. Después en [17] toman en cuenta más detalles de la dinámica del sistema como el impacto con el suelo, con esto se produce un comportamiento detallado del manipulador incluyendo el movimiento de la base. La medida de estabilidad es mejorada por incluir la flexibilidad del contacto de la base con el suelo, reformulan el problema utilizando un modelo de eslabones virtuales [18]. Con lo anterior muestran que el contacto flexible entre la base y el piso tiene una influencia en la estabilidad. En [19] extienden el criterio incluyendo en el modelo la fricción del contacto entre la base y el suelo, con esto muestran que las propiedades de fricción entre las ruedas y la tierra afectan a la estabilidad del manipulador móvil. En [3, 20] presentan una nueva medida de estabilidad llamada Fuerza-Ángulo, que es sensible a cargas y es aplicable a sistemas dinámicos sujetos a cargas inerciales y fuerzas externas. La medida propuesta es una simple interpretación geométrica, que consiste en un vector que se forma de las sumas de todas las fuerzas aplicadas al manipulador móvil, la estabilidad está en función del ángulo que forma esta fuerza con el eje tip-over, este eje es formado por dos puntos de contacto de las llantas con el piso adyacentes. ZETUF (Zero Tire Upward Force) en [21] presentan un criterio llamado ZETUF con base en las fuerzas de reacción de los neumáticos, el criterio no solo toma en cuenta la estabilidad sino que también puede ser usado como una medida de la direccionalidad de las llantas. El criterio desarrollado toma en cuenta la interacción dinámica del manipulador y la plataforma móvil dando como resultado una fuerza resultante y un momento del manipulador, estas ecuaciones son usadas para derivar las fuerzas actuando en las llantas. El vuelco ocurre si las fuerzas ascendentes de las llantas que ejerce el piso en los neumáticos se hace cero. MHS (Moment-Height-Stability) en [22] desarrollan un criterio de estabilidad el cual considera rotación pura sobre cada eje del polígono de apoyo debido al momento de inercia del robot, las fuerzas externas y el torque del sistema. En [23] extienden el uso de esta medida a manipuladores móviles con suspensión flexible y que trabajan en terreno irregular. En [24] consideran en el criterio la fuerza de la suspensión, las fuerzas laterales/longitudinales en la base móvil debidas a los efectos de inercia y finalmente los momentos aplicados a la estructura virtual que son dados por fuerzas laterales/longitudinales ejercidos por los pares. MNGR (Mean Normal Ground Reactions) en [25, 26] presentan un criterio de estabilidad que está basado en las reacciones de los puntos de apoyo, para obtener el criterio se calculan las fuerzas y momentos ejercidos por el manipulador sobre la base móvil, estas fuerzas se proyectan a cada uno de los puntos de apoyo. Como el vuelco de estos sistemas se da sobre el eje de vuelco se toman dos fuerzas normales adyacentes y se promedian. Como la altura del centro de masa afecta de forma inversa a la estabilidad del sistema, se multiplica el promedio por el inverso de la altura del centro de masa, así esta medida es sensible a la variación del centro de masa. TOM (Tip-Over Moment) en [27] presenta un método para el análisis de estabilidad al vuelco de un manipulador móvil con ruedas. Para este criterio, se encuentran las fuerzas de reacción del manipulador y los momentos ejercidos sobre la plataforma móvil, después se calcula el momento de vuelco. El máximo TOM en el sistema ofrece el mayor momento de vuelco, si el máximo valor es positivo, el sistema se está volcando, si el máximo valor es negativo, el sistema es estable con un momento de vuelco.

Existen muchas causas por las que un manipulador móvil puede sufrir un vuelco, de entre ellas la fuerza externa es una de las más importantes, esto se debe a que en múltiples tareas un robot está expuesto a una fuerza. Comúnmente los manipuladores móviles están interactuando con el medio, esta interacción involucra la presencia de fuerzas y momentos, por ejemplo: al abrir una puerta, llevar una carga pesada, manipular objetos, trabajar cooperativamente con un humano, etc. En este trabajo se propone evaluar la estabilidad al vuelco de un manipulador móvil que interactúa con fuerzas externas y momentos en su efector final, estas fuerzas y momentos son conocidos.

En este trabajo se obtiene el modelo cinemático y dinámico de un manipulador móvil, posteriormente se evalúa la medida de estabilidad MNGR para tres diversos casos en los cuales el manipulador móvil está enfrentando una fuerza. En el apartado 2 se muestra el tipo de manipulador móvil utilizado, se obtiene el modelo cinemático y dinámico y se presenta la aplicación del criterio de estabilidad al manipulador móvil. En el apartado 3 se realizan tres simulaciones: el efector final lleva una carga mientras el brazo se alarga y la plataforma móvil permanece fija; se aplica un momento incremental al efector final cuando el robot adopta una postura estática

ISBN: 978-607-9394-14-1.



estable; el manipulador móvil realiza una trayectoria en donde la plataforma móvil avanza hacia enfrente mientras que el manipulador se alarga llevando una carga. Finalmente se muestran las conclusiones de este trabajo.

2. Modelado cinemático y dinámico del manipulador móvil

Con el fin de mostrar el análisis de estabilidad en un manipulador móvil, se presenta el modelo cinemático y dinámico del robot. Para el modelo cinemático se tomara en cuenta lo presentado en [28]. Las siguen las siguientes consideraciones para el modelado: la plataforma móvil se mueve sobre una superficie plana, los eslabones del manipulador móvil son rígidos y se cumple la condición de rodadura.

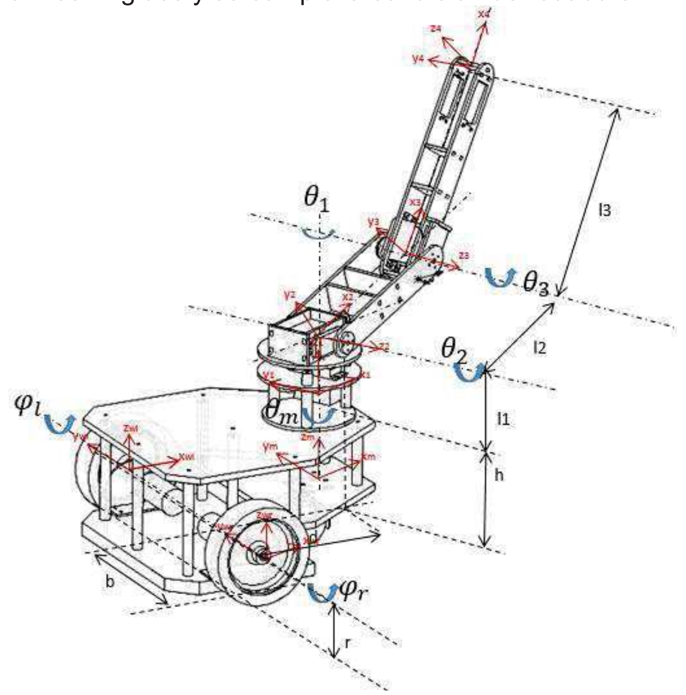


Figura 1.-Manipulador móvil.

Las coordenadas generalizadas se separan en dos conjuntos $q = [q_m, q_a]^T$, donde $q_m \in R^m$ describe las coordenadas de la plataforma móvil, $q_a \in R^a$ describe las coordenadas del manipulador, las coordenadas generalizadas del manipulador móvil en velocidad vienen dadas por $\dot{q} = [\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\theta}, \dot{\varphi}_r, \dot{\varphi}_l, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$, donde $\dot{x}_m$ y $\dot{y}_m$ son la velocidad lineal de la plataforma móvil en cada eje, $\dot{\theta}$ la velocidad angular, $\dot{\varphi}_r$ y $\dot{\varphi}_l$ son las velocidades de las llantas derecha e izquierda respectivamente, $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$ y $\dot{\theta}_3$ son las velocidades angulares del manipulador. Los parámetros del manipulador móvil son: r radio de las llantas, d es la distancia sobre el eje x_m de la plataforma móvil al eje de las llantas, b es la distancia sobre el eje y_m a las llantas, h es la distancia medida del sistema de referencia (x_m, y_m, z_m) al sistema de referencia (x_1, y_1, z_1) sobre el eje z_m, l_1, l_2 y l_3 son las longitudes de los eslabones del manipulador.

Para encontrar el modelo cinemático en velocidades del manipulador móvil, se utiliza la técnica de propagación de velocidades [29], ${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R({}^{i}v_i + {}^{i}\omega_i \times {}^{i}P_{i+1})$ para la velocidad lineal y ${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_{i}R\,{}^{i}\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}\,{}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$ para la velocidad angular. A continuación se realizaron dos propagaciones de velocidades, primero se propago la velocidad del sistema (x_m, y_m, z_m) hacia cada una de las llantas (x_{wr}, y_{wr}, z_{wr}) y (x_{wl}, y_{wl}, z_{wl}), con esta propagación se encuentra el Jacobiano del robot móvil; segundo, se realizó una propagación de velocidades del sistema de referencia (x_m, y_m, z_m) al sistema de referencia (x_4, y_4, z_4), con esta propagación es posible derivar el modelo dinámico.

2.1 Modelo dinámico

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 15, pp.180-191.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Considere el manipulador móvil de la figura 1 de n GDL (grados de libertad) con base móvil no-holonómica. El sistema mecánico restringido puede ser descrito como:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + d(t) = B\tau + J(q)^T F - A(q)^T \lambda \tag{1}$$

Donde $M(q) \in R^{m+a}$ es la matriz de inercia simétrica definida positiva; $C(q,\dot{q})\dot{q} \in R^{m+a}$ denota las fuerzas centrifugas y de Coriolis; $G(q) \in R^{a}$ es el vector de torques gravitacionales; $d(t)$ denota las perturbaciones externas; $\tau \in R^{m+a}$ son las entradas de control; $B(q) \in R^{m+a}$ es una matriz de transformación de entrada; $J(q) \in R^{m+a}$ es la matriz jacobiana; $A(q) \in R^{m+a}$ matriz de restricciones de la plataforma móvil; $\lambda \in R^{k}$ son los multiplicadores de Lagrange correspondientes a las restricciones no-holonómicas y holonómicas de la plataforma móvil; $F \in R^{a}$ son las fuerzas externas presentes en el efector final.

2.2 Criterio de estabilidad

Para este estudio se utiliza el criterio de estabilidad MNGR [30], la plataforma móvil tiene una frontera de apoyo simétrica en donde la base móvil tiene 4 apoyos con el piso, 2 de ellos N_1 y N_2 formados por los apoyos de las llantas con el piso y dos apoyos formados por ruedas locas colocadas en la parte frontal de la plataforma móvil N_3 y N_4.

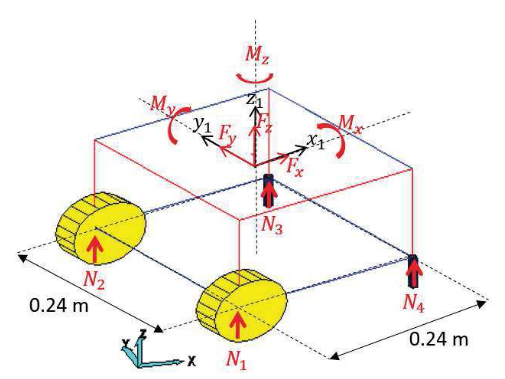


Figura 2.- Fuerzas normales en la plataforma móvil.

Donde M_x, M_y y F_z son calculados por medio del algoritmo iterativo de dinámica Newton-Euler. Las fuerzas de reacción N_1, N_2, N_3 y N_4, de la figura 2 son calculadas como sigue:

$$N_1 = \frac{F_z}{4} + \frac{m_c g}{4} + \left(m_w g\right) + Nx_1 + Ny_1 \tag{2}$$

$$N_2 = \frac{F_z}{4} + \frac{m_c g}{4} + \left(m_w g\right) + Nx_2 + Ny_2 \tag{3}$$

$$N_3 = \frac{F_z}{4} + \frac{m_c g}{4} + \left(m_w g\right) + Nx_3 + Ny_3 \tag{4}$$

$$N_4 = \frac{F_z}{4} + \frac{m_c g}{4} + \left(m_w g\right) + Nx_4 + Ny_4 \tag{5}$$

Donde $F_z/4$ es la fuerza F_z producida por el manipulador sobre la plataforma móvil dividida por el número de apoyos, $m_c g/4$ es el peso producido por la plataforma móvil dividida por el número de apoyos, $m_w g$ es el peso de las llantas de la plataforma móvil. Además las relaciones de las reacciones provocadas por los momentos de acuerdo al método de superposición son: $Nx_4 = -Nx_3$, $Nx_3 = Nx_2$, $Nx_1 = -Nx_2$, $Nx_2 = M_x / (0.12 * 4)$, $Ny_2 = Ny_1$, $Ny_3 = Ny_4$, $Ny_4 = -Ny_1$, $Ny_1 = M_y / (0.12 * 4)$.



Utilizando 2-1 se puede calcular el criterio de estabilidad MNGR:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{(cm_z)^{-1} \frac{N_1 + N_2}{2}}{\left(cm_{z_{nom}}\right)^{-1} \left(\frac{N_{1_{nom}} + N_{2_{nom}}}{2}\right)} \quad (6)$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{(cm_z)^{-1} \frac{N_2 + N_3}{2}}{\left(cm_{z_{nom}}\right)^{-1} \left(\frac{N_{2_{nom}} + N_{3_{nom}}}{2}\right)} \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_3 = \frac{(cm_z)^{-1} \frac{N_3 + N_4}{2}}{\left(cm_{z_{nom}}\right)^{-1} \left(\frac{N_{3_{nom}} + N_{4_{nom}}}{2}\right)} \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_4 = \frac{(cm_z)^{-1} \frac{N_4 + N_1}{2}}{\left(cm_{z_{nom}}\right)^{-1} \left(\frac{N_{4_{nom}} + N_{1_{nom}}}{2}\right)} \quad (9)$$

Donde la altura del centro de masa es:

$$\begin{aligned} cm_z = {} & (hm_c - m_3(l_{c3}(\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)) - l_1 + l_2\sin(\theta_2)) + \\ & l_{c1}m_1 + m_2(l_1 - l_{c2}\sin(\theta_2))) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_c) \end{aligned} \quad (10)$$

Para normalización del criterio de estabilidad se toma normalmente la postura de home del manipulador, en este estudio se toma la postura en la cual el robot tiene mayor estabilidad. En esta postura el manipulador tiene los valores en sus coordenadas de configuración: $x=0$, $y=0$, $\theta=0$, $\theta_1=0$, $\theta_2=0$ y $\theta_3=-\pi/2$. De esta manera las reacciones en esta postura son: $N_{1_{nom}}=416.9250\ [N]$, $N_{2_{nom}}=416.9250\ [N]$, $N_{3_{nom}}=416.9250\ [N]$, $N_{4_{nom}}=416.9250\ [N]$ y el centro de masa tiene una altura de $cm_{z_{nom}}=0.12\ [m]$. Las ecuaciones 6-9 ofrecen una medida de estabilidad sobre cada borde, este valor está comprendido entre 0 y 1, donde 0 indica que existen puntos de apoyo que se han despegado del piso, por otro lado 1 indica que la estabilidad es máxima. Con el criterio es posible saber cuál es el borde de vuelco y cuáles son los apoyos con el piso que se están despegando. En este trabajo se toma el criterio de estabilidad como único, es decir, un solo valor de $\hat{\beta}$ indica la estabilidad del sistema, esto es:

$$\hat{\beta} = \min[\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4] \quad (11)$$

Si el valor de $\hat{\beta}$ es cercano a cero, el sistema está próximo a volcarse, si el valor de $\hat{\beta}$ es cercano a 1 el sistema está colocado en una postura estable.

3. Simulaciones

Con el fin de mostrar la influencia de las fuerzas externas en un manipulador móvil, se realizan las simulaciones de tres casos. Los parámetros del manipulador móvil son: $d=0.02m$, $b=0.12m$, $r=0.05m$, $h=0.15m$, $l_1=0.05m$, $l_2=0.25m$, $l_3=0.25m$, $m_w=5kg$, $m_c=30kg$, $g=9.81 m/s^2$, $m_1=15kg$, $m_2=10kg$ y $m_3=10kg$. Para el movimiento de las juntas del manipulador móvil se utilizó un perfil quintico con condiciones de velocidad y aceleración igual a cero:

$$R_t = p_i + \left(10\frac{t}{tf}^3 - 15\frac{t}{tf}^4 + 6\frac{t}{tf}^5\right)\left(p_f - p_i\right) \quad (12)$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 15, pp.180-191.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$V_t = \left(30\frac{t^2}{tf^3} - 60\frac{t^3}{tf^4} + 30\frac{t^4}{tf^5}\right)\left(p_f - p_i\right) \tag{13}$$

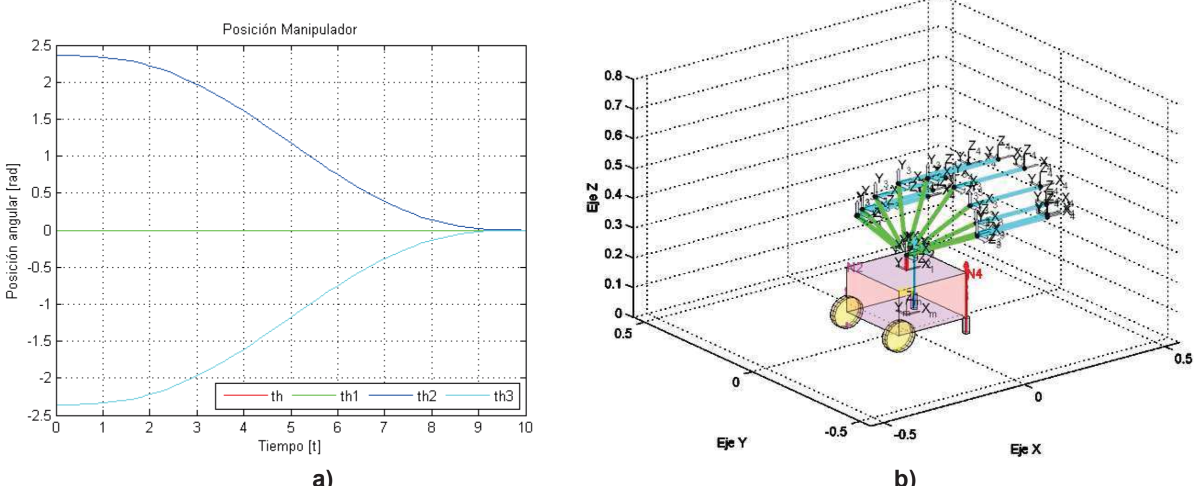
$$A_t = \left(60\frac{t}{tf^3} - 180\frac{t^2}{tf^4} + 120\frac{t^3}{tf^5}\right)\left(p_f - p_i\right) \tag{14}$$

Donde p_i, p_f definen posiciones iniciales y finales.

Caso 1: El brazo del manipulador móvil se extiende llevando una carga sobre el eje z del sistema inercial, la plataforma móvil permanece fija. Esta prueba es similar cuando un manipulador móvil manipula objetos pesados y la plataforma móvil permanece fija, por ejemplo: el robot realiza una tarea de tomar un objeto y dejarlo en una posición. La prueba se realizó en un tiempo de 10 segundos, las condiciones iniciales y finales se muestran en la tabla 1:

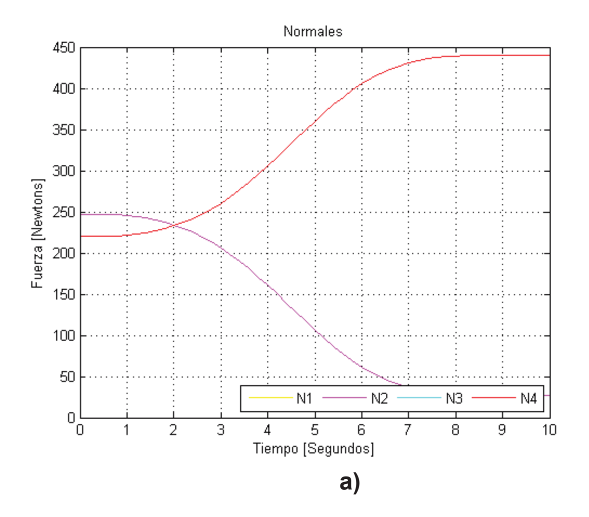
Tabla 1.- Condiciones iniciales y finales de la simulación.

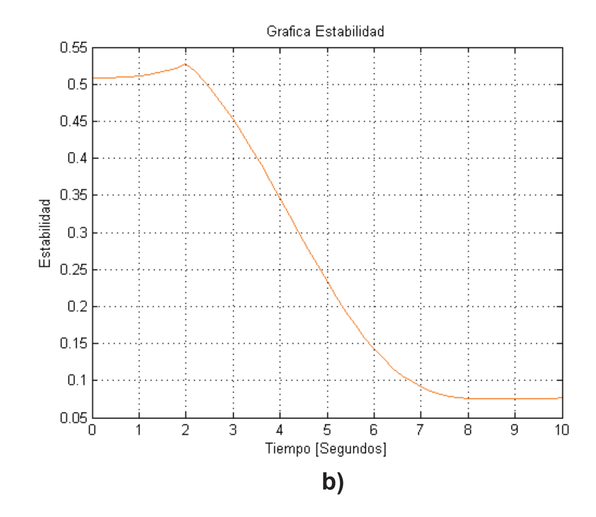
Condiciones iniciales	**Condiciones finales**
$q_i = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [0m, 0m, 0^o, 0^o, 135^o, -135^o]^T$	$q_f = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [0m, 0m, 0^o, 0^o, 0^o, 0^o]^T$
$F_i = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 100N]^T$	$F_f = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 100N]^T$
$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [0Nm, 0Nm, 0Nm]^T$	$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [0Nm, 0Nm, 0Nm]^T$



a) **b)**

Figura 3.- a) Juntas del manipulador, b) movimiento del manipulador móvil.





a) **b)**

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 4.- a) Fuerzas normales N_1, N_2, N_3 y N_4 **b) Estabilidad del manipulador móvil.**

En el tiempo cero el manipulador móvil se encuentra estable, esto se puede observar en la figura 4 a), donde las fuerzas normales no tienen mucha diferencia al inicio del movimiento. Como el robot tiene 4 apoyos distribuidos en forma simétrica y además el movimiento del manipulador se realiza hacia enfrente, N_1 y N_2 son iguales y N_3 y N_4 son iguales. Por consiguiente, en el avance del manipulador se nota una disminución de las fuerzas N_1 y N_2 y se nota un incremento de las fuerzas de reacción N_3 y N_4. Lo anterior quiere decir que el manipulador tiende a volcarse sobre el borde frontal. La figura 4 b) muestra como disminuye la estabilidad, esto se debe a dos factores, el movimiento del manipulador móvil y además la carga presente en el efector final. Si no existiera una carga en el efector final del manipulador móvil, el movimiento realizado no implicaría una disminución casi a cero de la estabilidad.

Caso 2: El manipulador móvil adopta una postura estándar estable y se le aplica un momento incremental positivo al efector final sobre el eje X del sistema inercial. Esta prueba es similar cuando el robot permanece estable estáticamente y en su efector final se presenta un momento variable, por ejemplo: el manipulador realiza la tarea de atornillar un tornillo. La prueba se realizó en un tiempo de 10 segundos, las condiciones iniciales y finales se muestran en la tabla 2:

Tabla 2.- Condiciones iniciales y finales de la simulación.

Condiciones iniciales	Condiciones finales
$q_i = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [0m, 0m, 0^o, 0^o, 135^o, -135^o]^T$	$q_f = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [0m, 0m, 0^o, 0^o, 135^o, -135^o]^T$
$F_i = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 0N]^T$	$F_f = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 0N]^T$
$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [0Nm, 0Nm, 0Nm]^T$	$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [100Nm, 0Nm, 0Nm]^T$

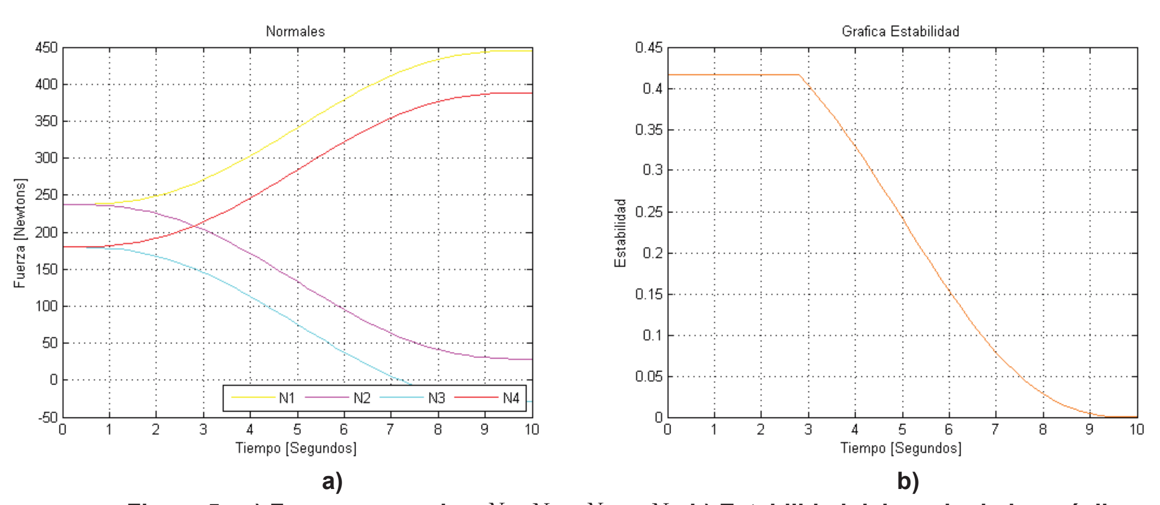


Figura 5.- a) Fuerzas normales N_1, N_2, N_3 y N_4 **b) Estabilidad del manipulador móvil.**

Para esta prueba solo un momento dado en en eje x y y influyen en la estabilidad del robot, un momento considerado en el eje z no afectaría la estabilidad debido a que este no se proyecta en las fuerzas normales. En esta prueba se considera al manipulador sin movimiento, es decir permanece en una estabilidad estática, sin embargo, un momento puede ser capaz de disminuir la estabilidad. La figura 5 a) muestra que el eje de vuelco es el comprendido entre N_1 y N_4, contrario a los bordes N_2 y N_3 que son los que tienden a desprenderse. Es importante observar que, aunque un soporte se haga cero (segundo 7 de la figura 4 a)) esto no quiere decir que el sistema se haya volcado (segundo 7 de la figura 4 a)).

Caso 3: El manipulador móvil realiza una trayectoria moviéndose con un perfil quintico, la base realiza un movimiento hacia adelante positivamente en un cuarto de arco y el manipulador se estira mientras este lleva una carga en su efector final aplicada sobre el eje Z inercial. Esta tarea es la mas complicada, todo el sistema se

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 15, pp.180-191.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



mueve a la vez con lo cual se generan fuerzas y momentos inerciales internos que cambian la estabilidad. La prueba se realizó en un tiempo de 10 segundos, las condiciones iniciales y finales se muestran en la tabla 3:

Tabla 3.- Condiciones iniciales y finales de la simulación.

Condiciones iniciales	**Condiciones finales**
$q_i = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [-0.5m, 0.3m, -60^o, -30^o, 135^o, -135^o]^T$	$q_f = [x_m, y_m, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T = [0m, 0m, 0^o, 0^o, 0^o, 0^o]^T$
$F_i = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 100N]^T$	$F_f = [f_x, f_y, f_z]^T = [0N, 0N, 100N]^T$
$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [0Nm, 0Nm, 0Nm]^T$	$M_i = [m_x, m_y, m_z]^T = [0Nm, 0Nm, 0Nm]^T$

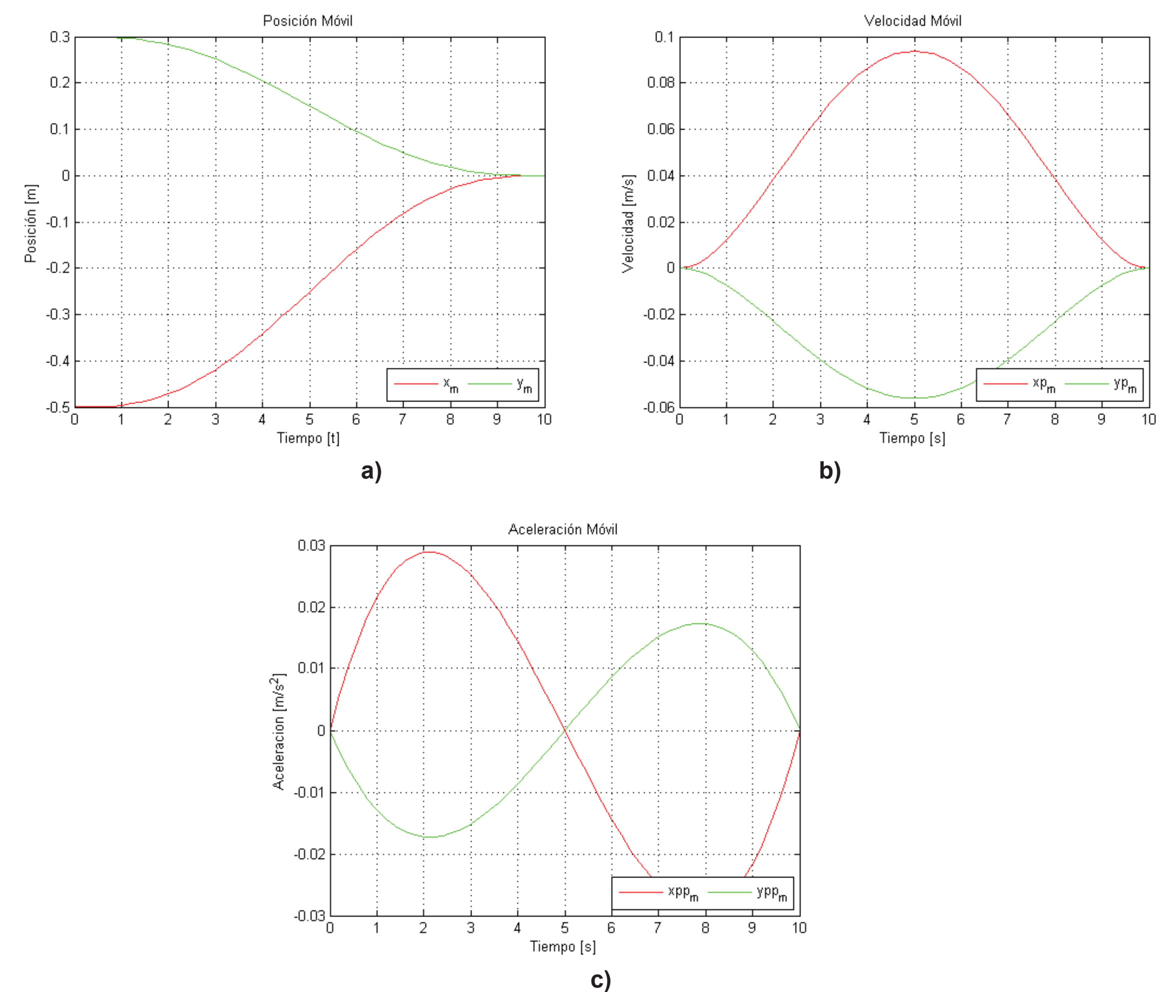
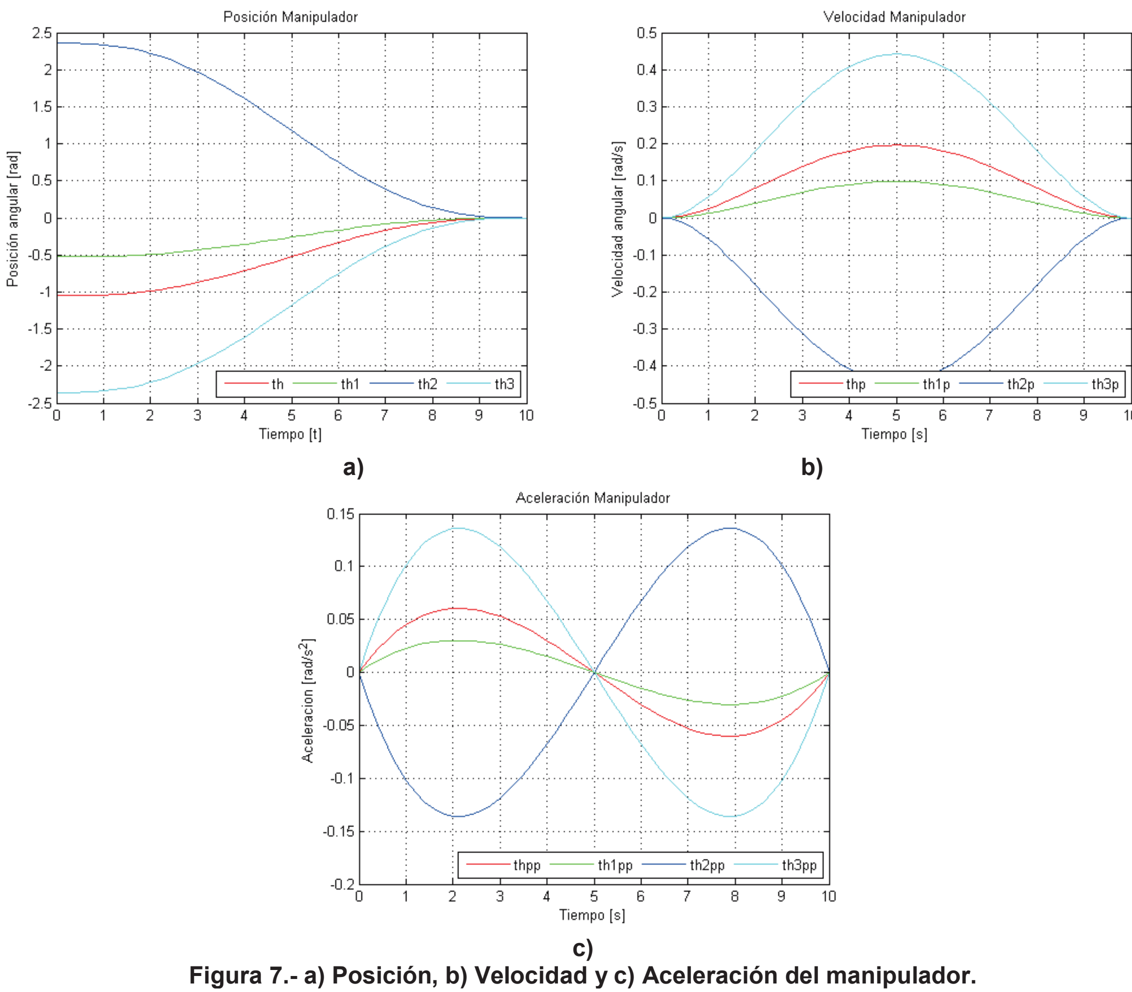


Figura 6.- a) Posición, b) Velocidad y c) Aceleración de la plataforma móvil.





c)

Figura 7.- a) Posición, b) Velocidad y c) Aceleración del manipulador.

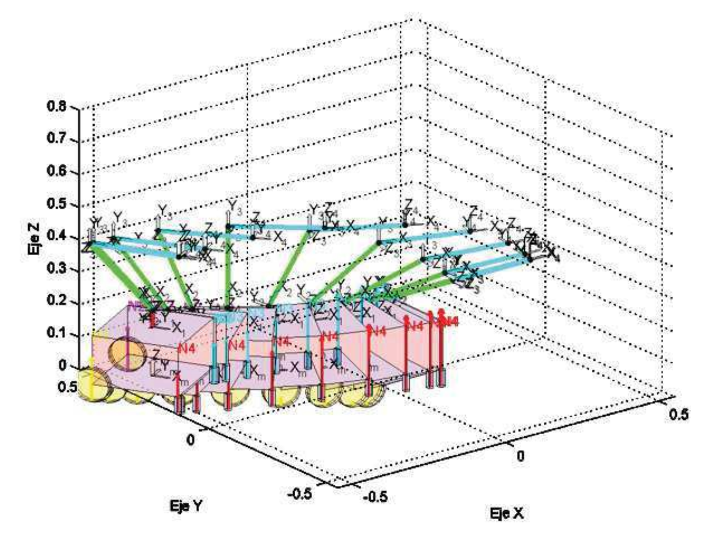
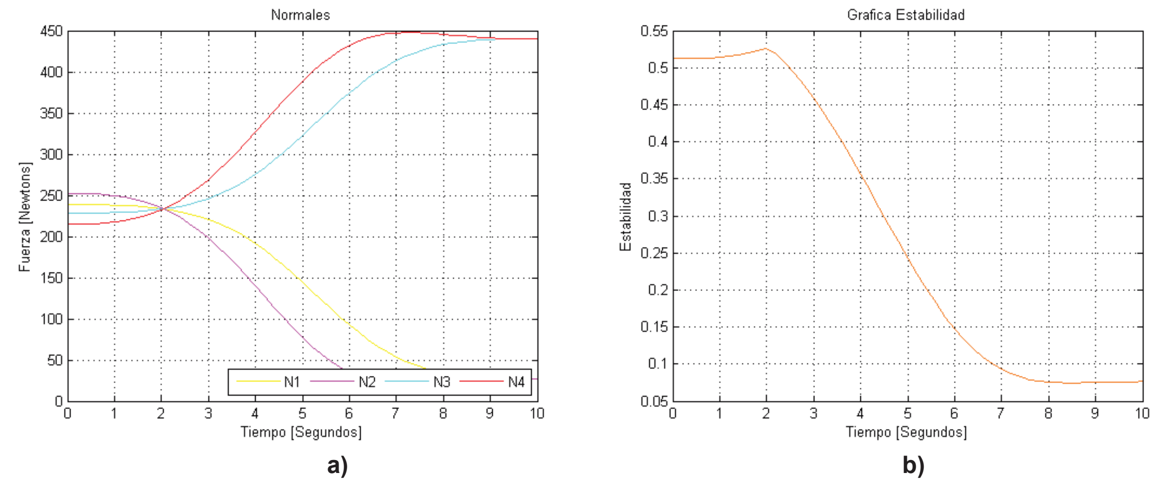


Figura 8.- Simulación del movimiento del manipulador móvil.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





a) b)

Figura 9.- a) Fuerzas normales N_1, N_2, N_3 y N_4 b) Estabilidad del manipulador móvil.

En la figura 6 se presenta la posición, velocidad y aceleración que realiza la plataforma móvil durante prueba, en la figura 7 se presenta la posición, velocidad y aceleración del manipulador durante la prueba. En la prueba todo el sistema esta en movimiento, la plataforma se mueve sobre una trayectoria curva la cual genera fuerzas centrifugas que hacen mas propenso al sistema a volcarse, el manipulador gira en su base debido al ángulo θ_1 y además se estira llevando una carga en su efector final. Todos los factores anteriores se ven reflejados en los puntos de apoyo y cambian la estabilidad, en tareas de este tipo en donde el manipulador móvil se mueve sobre una trayectoria y además el robot lleva una carga en el efecto final es más propenso al vuelco.

4. Conclusiones

En este trabajo se realizó el análisis de la estabilidad en un manipulador móvil el cual presenta fuerzas y momentos externos en su efector final. Se realizaron tres simulaciones, estas son similares a las que realiza un manipulador móvil que interactúa con fuerzas externas. Estas tareas incluyen fuerzas en el efector final, momentos externos que varían en el tiempo y movimiento del manipulador móvil sobre una trayectoria mientras existe una fuerza de entrada. Las simulaciones muestran que una fuerza externa en el efector de un manipulador móvil es algo a tomar en cuenta para evitar el vuelco de este sistema.

La consideración de las fuerzas de reacción normales a las llantas en el criterio de estabilidad MNGR son adecuadas para medir la estabilidad del sistema, además ofrecen información indicando sobre que borde se presenta el vuelco y cuales son los puntos de apoyo que se desprenden primero.

En este trabajo se pudo observar que una fuerza externa puede generar un vuelco en un manipulador móvil sin importar que este permanezca estático o en movimiento. Esto lleva a la necesidad del desarrollo de algoritmos que eviten el vuelco cuando un manipulador móvil está expuesto a fuerzas y momentos externos. Actualmente se está realizando el proceso de validación experimental de este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen en lo que corresponde a la DGAPA, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN118117: “Investigación sobre robótica topofixadaptable aplicada a robots móviles, híbridos, que operan en ambientes inteligentes estructurados, en tareas de sujeción, traslación y orientación de objetos con cierto grado de asimetría”. Así también, se extiende un agradecimiento al

ISBN: 978-607-9394-14-1.



programa de becas de CONACYT por el apoyo económico que permitió dirigir la atención directamente a la realización de este proyecto.

Referencias

[1] M. Haddad, S. Hanchi, and H. E. Lehtihet, "Point-to-point trajectory planning of wheeled mobile manipulators with stability constraint. Extension of the random-profile approach," *European Journal of Mechanics - A/Solids,* vol. 28, pp. 477-493, 2009.

[2] M. Mosadeghzad, D. Naderi, and S. Ganjefar, "Dynamic modeling and stability optimization of a redundant mobile robot using a genetic algorithm," *Robotica,* vol. 30, pp. 505-514, 2011.

[3] E. G. Papadopoulos and D. A. Rey, "New measure of tipover stability margin for mobile manipulators," in *Proceedings of the 1996 13th IEEE International Conference on Robotics and Automation. Part 1 (of 4), April 22, 1996 - April 28, 1996*, Minneapolis, MN, USA, 1996, pp. 3111-3116.

[4] M. Norouzi, J. V. Miro, and G. Dissanayake, "A statistical approach for uncertain stability analysis of mobile robots," in *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, pp. 191-196.

[5] T. Fukuda, Y. Fujisawa, K. Kosuge, F. Arai, E. Muro, H. Hoshino*, et al.*, "Manipulator/vehicle system for man-robot cooperation," in *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, 1992, pp. 74-79 vol.1.

[6] C. Qiu, Q. Cao, L. Yu, and S. Miao, "Improving the stability level for on-line planning of mobile manipulators," *Robotica,* vol. 27, p. 389, 2008.

[7] L. Choon-Young, S. Kap-Ho, K. Chang-Hyun, O. Sang-Keon, and L. Ju-Jang, "A system for gait rehabilitation: mobile manipulator approach," in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, 2002, pp. 3254-3259.

[8] S. Dubowsky and E. E. Vance, "Planning mobile manipulator motions considering vehicle dynamic stability constraints," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation - 1989, May 14, 1989 - May 19, 1989*, Scottsdale, AZ, USA, 1989, pp. 1271-1276.

[9] S. Eslami, D. Naderi, A. Meghdari, and A. Ghaffari, "Enhancement of the tipover stability of mobile manipulators with non-holonomic constraints using an adaptive neuro-fuzzy-based controller," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering,* vol. 223, pp. 201-213, 2009.

[10] D. A. Messuri and C. A. Klein, "Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion," *IEEE journal of robotics and automation,* vol. RA-1, pp. 132-141, 1985.

[11] Y. Li and Y. Liu, "Real-Time Tip-Over Prevention and Path Following Control for Redundant Nonholonomic Mobile Modular Manipulators via Fuzzy and Neural-Fuzzy Approaches," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,* vol. 128, p. 753, 2006.

[12] M. Eslamy and S. A. A. Moosavian, "Dynamics and cooperative object manipulation control of suspended mobile manipulators," *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications,* vol. 60, pp. 181-199, 2010.

[13] E. Garcia, J. Estremera, and P. G. de Santos, "A comparative study of stability margins for walking machines," *Robotica,* vol. 20, pp. 595-606, 2002.

[14] S. Sugano, H. Qiang, and I. Kato, "Stability criteria in controlling mobile robotic systems," in *Intelligent Robots and Systems '93, IROS '93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on*, 1993, pp. 832-838 vol.2.

[15] J. Kim, W. K. Chung, Y. Youm, and B. H. Lee, "Real-time ZMP compensation method using motion for mobile manipulators," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on,* vol. 2, pp. -1972 vol.2, 2002.

[16] A. Ghasempoor and N. Sepehri, "A measure of machine stability for moving base manipulators," in *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, 1995, pp. 2249-2254 vol.3.

[17] R. F. Abo-Shanab and N. Sepehri, "On dynamic stability of manipulators mounted on mobile platforms," *Robotica,* vol. 19, pp. 439-449, 2001.

[18] R. F. Abo-Shanab and N. Sepehri, "Effect of base compliance on the dynamic stability of mobile manipulators," *Robotica,* vol. 20, pp. 607-613, 2002.

[19] R. F. Abo-Shanab and N. Sepehri, "Dynamic modeling of tip-over stability of mobile manipulators considering the friction effects," *Robotica,* vol. 23, pp. 189-196, 2005.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[20] E. Papadopoulos and D. A. Rey, "The Force-Angle Measure of Tipover Stability Margin for Mobile Manipulators," *Vehicle System Dynamics,* vol. 33, pp. 29-48, 2000/01/01 2000.
[21] A. Meghdari, D. Naderi, and M. R. Alam, "Neural-network-based observer for real-time tipover estimation," *Mechatronics,* vol. 15, pp. 989-1004, 2005.
[22] S. A. A. Moosavian and K. Alipour, "Stability evaluation of mobile robotic systems using moment-height measure," in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, June 7, 2006 - June 9, 2006*, Bangkok, Thailand, 2006.
[23] S. A. A. Moosavian, K. Alipour, and Y. Bahramzadeh, "Dynamics modeling and tip-over stability of suspended wheeled mobile robots with multiple arms," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2007, October 29, 2007 - November 2, 2007*, San Diego, CA, United states, 2007, pp. 1210-1215.
[24] K. Alipour and S. A. A. Moosavian, "Postural stability of wheeled mobile manipulators with flexible suspension considering tire friction model," in *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM 2009, July 14, 2009 - July 17, 2009*, Singapore, Singapore, 2009, pp. 764-769.
[25] J. A. Souza-Jimenez, "Análisis de estabilidad de un manipulador híbrido móvil " *Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México,* 2017.
[26] V. J. G.-V. J. Antonio Souza-Jimenez, Neftali Elorza-Lopez, Noe Alfredo Martinez-Sanchez, "Prueba experimental de un algoritmo de Estabilidad Tip-Over basado en el criterio de las reacciones normales promedio," *SOMI XXIX Congreso de Instrumentación,* 2014.
[27] S. Guo, T. Song, F. Xi, and R. P. Mohamed, "Tip-Over Stability Analysis for a Wheeled Mobile Manipulator," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,* vol. 139, pp. 054501-054501-7, 2017.
[28] G. V. V. J. Martínez Sánchez Noé Alfredo, López Parra Marcelo, Peña Medina Erik, "Modelo cinemático inverso en velocidades de un manipulador móvil no-holónomo para la coordinación de movimientos," *15° CONGRESO NACIONAL DE MECATRÓNICA,* 2016.
[29] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics & Control*: Addison-Wesley Publ., 1986.
[30] J. A. Souza-Jimenez and V. J. Gonzalez-Villela, "Kinematics and Tip-Over Stability Analysis for a Hybrid Serial-Parallel Mobile Manipulator," pp. 1237-1246, 2011.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 16, pp.192-201.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Análisis Cinemático y de Reconfiguración Geométrica de un Robot Paralelo Tipo Delta

Hernández Reyna José[1] y Sandoval Castro X. Yamile[2]

[1] CFATA-UNAM. Boulevard Juriquilla No. 3001, Querétaro, Qro. C.P. 76230

[2] CONACYT-IPN. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090.

Resumen

Se presenta la descripción y análisis cinemático reconfigurable de un robot paralelo tipo Delta, para ello se analizó la cinemática directa en posición del robot con el método de intersección de esferas. Se elaboró su representación 3D en el entorno de Matlab para simular su comportamiento. Se hizo un estudio de cinemática reconfigurable basado en el número de condición de su matriz jacobiana, definida en el análisis cinemático, para mejorar su desempeño cinemático. Se graficaron los resultados del estudio de cinemática reconfigurable acotando los resultados a un espacio que comprenda dimensiones de diseño y construcción deseadas para el robot. Tomando como base el conjunto de valores óptimos de acuerdo al estudio, se realizó un modelo CAD donde se muestra la disposición de elementos que conforman la estructura del robot.

Palabras clave: Robot paralelo tipo Delta, Cinemática reconfigurable, Número de condición, Matriz jacobiana.

1. Introducción

Un robot paralelo se compone de una base móvil y de una fija, ambas unidas por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. Es en la base móvil donde se ubica el efector final del robot.

Los robots paralelos fueron introducidos hace algunas décadas por Gough (1975) y Stewart (1965). Clavel (1989) propuso el robot Delta, utilizado en aplicaciones de alta velocidad en la industria, M. Méndez (2009).

La idea básica en el diseño del robot paralelo Delta es el uso de paralelogramos. Un paralelogramo permite un enlace de salida para permanecer en una orientación fija con respecto a un enlace de entrada. El uso de tres de estos paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil que permanece solo con tres grados de libertad puramente traslacionales. Los enlaces de entrada de los tres paralelogramos son montados en palancas giratorias a través de articulaciones de revoluta. Las articulaciones de las palancas giratorias se accionan en dos diferentes formas: con motores de rotación (servo, DC o AC) o con actuadores lineales. Finalmente, se usa un mecanismo para transmitir movimiento rotatorio desde la base hasta un efector final montado en la plataforma móvil. El uso de actuadores montados en la base y enlaces de baja masa permite que la plataforma móvil logre grandes aceleraciones en ambientes experimentales y en aplicaciones industriales, V. Poppeová et al. (2011).

La base móvil puede tener una aceleración de hasta 50 veces la gravedad(g) en entornos experimentales y entre 12 y 15g en aplicaciones industriales, V. Poppeová et al. (2011).

Los robots Delta son adecuados para alta velocidad en aplicaciones de “pick and place” que involucren peso ligero y piezas con geometría simple.

Con una estrategia de reconfiguración geométrica se puede mejorar el desempeño cinetostático del robot tipo Delta en su espacio de trabajo operable, medible cuando el número de condición de su

ISBN: 978-607-9394-14-1.



matriz jacobiana tiende a ser uno; cuando el número de condición tiende a infinito, entonces se acerca a una configuración singular, por lo que los valores obtenidos que converjan en uno o que tiendan a serlo, se consideran como óptimos para este estudio.

Una reconfiguración geométrica para el robot paralelo tipo Delta implica la variación de uno, algunos o todos los parámetros angular, R, r, la y lb (descritos en la sección 2.2). Se modificó el parámetro R porque elegir más de uno incrementa el problema de redundancia en los grados de libertad del robot.

J.-P Merlet, en su trabajo “Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots”, emplea el número de condición (K) denominándolo factor de amplificación de error, al usar la norma de Frobenius o la 2-norma el valor mínimo es K=1.

Una pose isotrópica de un robot se define como una pose donde K es igual a 1 y el robot que solo tiene poses isotrópicas en su espacio de trabajo es denominado como un robot isótropo, esto indica que las magnitudes vectoriales de un robot isótropo deben ser las mismas sea cual sea la dirección del movimiento, en robótica se considera como parámetro de diseño.

Merlet concluye que los índices de destreza clásicos como el número de condición no son muy adecuados para robots paralelos, por su parte refiere que los índices más apropiados son la determinación de los errores de posicionamiento máximo, sus valores promedio y varianza.

M. Maya et al. (2013), realiza la reconfiguración de R y afirma que es una buena opción para propósitos prácticos. Tal reconfiguración permite un ajuste en la forma y el volumen del espacio de trabajo del robot y produce cambios en su capacidad de carga. Para un punto dado en el espacio de trabajo, un robot puede manejar diferentes cargas.

El presente trabajo se enfoca en la descripción geométrica del robot paralelo tipo Delta, se realiza su análisis cinemático directo empleando un método geométrico basado en la intersección de esferas; una vez realizado el análisis cinemático se aplicó la reconfiguración geométrica variando el parámetro R del robot Delta.

2. Estructura del robot y modelo cinemático

Se propone la implementación del robot con componentes COTS (Commercial Off The Shelf), se usa una tarjeta Raspberry Pi 2 Model B, potenciómetros con acondicionamiento de señal en microcontroladores ATmega que fungen como transductores de posición angular, además de la adaptación de elementos no utilizados en robótica, por ejemplo para sustitución de rótulas.

En el entorno de Simulink se ha implementado la cinemática inversa y el sistema de control de posición, se cuenta con la alternativa de operación remota mediante una App desarrollada para iOS. Lo anterior no es el tema central de este trabajo, se menciona porque el estudio aquí presentado es parte del prototipo.

El robot paralelo Delta posee tres grados de libertad, la posición del efector final depende de tres actuadores rotatorios; posee un eslabón unido directamente a cada actuador rotatorio, posee un segundo eslabón unido a cada uno de los primeros, se forma una junta esférica en la unión de eslabones.

El efector final de este robot se encuentra en un espacio tridimensional, en la figura 1 se muestra un esquema del mecanismo donde se muestran los elementos que lo constituyen.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



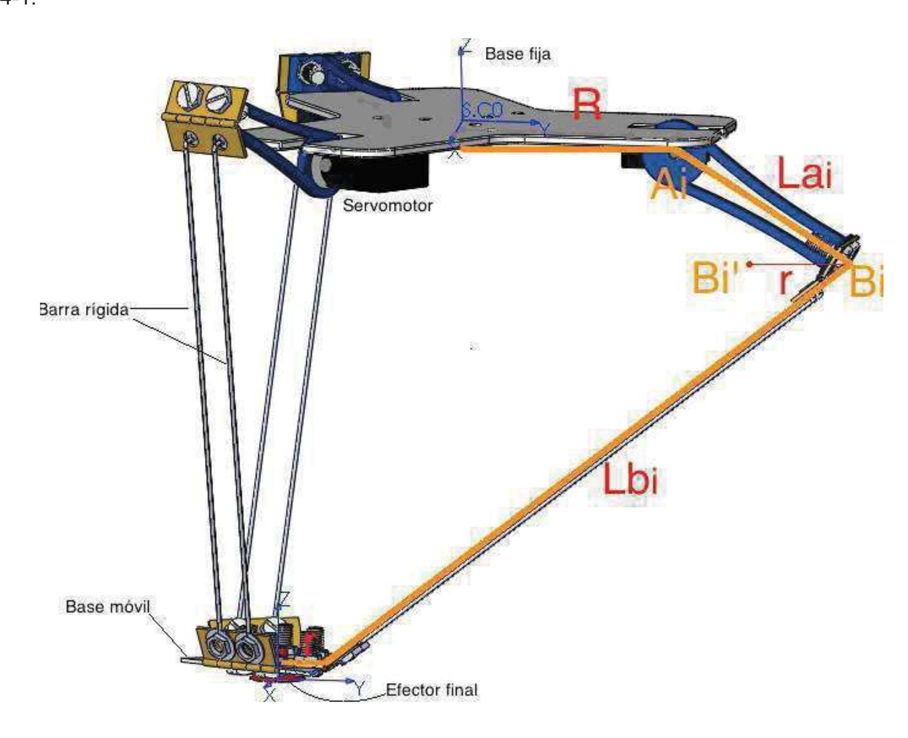


Figura 1. Elementos de robot Delta.

2.1 Representación geométrica.

En la figura 2 se se muestra con rectas amarillas el plano formado por los ejes de los actuadores rotacionales, el punto rojo al centro representa la proyección del centro de la base fija, lugar donde se colocó el sistema de referencia inicial del robot.



Figura 2. Proyección del centro de la base fija en el plano formado por los ejes.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 16, pp.192-201.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



El análisis se realizó para obtener la solución de un sistema articulado, donde se colocaron los sistemas de referencia en la figura 2, debido a la disposición espacial de los brazos en el robot, la solución para los brazos 2 y 3 corresponde a la del brazo 1, considerando una rotación en el eje z de 120º y 240º respectivamente.

En la figura 3 se presenta la i-ésima extremidad a través de un diagrama cinemático, donde puede observarse el marco de referencia ubicado en la base fija.

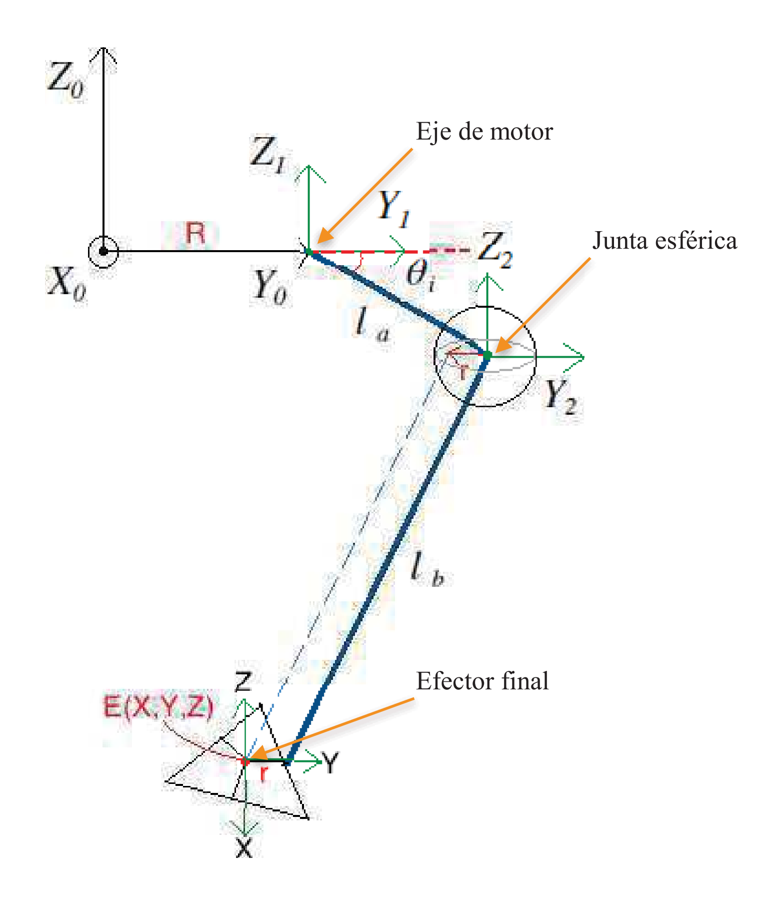


Figura 3. Representación geométrica y parámetros del robot Delta.

En la figura 3, se colocó el sistema de referencia 0 de modo que el eje Y se alineó con el eje del motor, su vez alineado con el eslabón la; en el punto que corresponde el eje del motor se colocó el sistema de referencia 1; el número 2 se colocó al final del eslabón la.

Se debe señalar que si bien el sistema de referencia 2 se colocó en el punto indicado en la figura 3, existe un grado de libertad adicional, es decir, desplazamiento en el plano X0-Z0, dicho desplazamiento depende de la posición de los 3 motores simultáneamente y corresponde a una junta esférica, una característica en el robot Delta.

Por último, se colocó un sistema de referencia, indicado con E(X,Y,Z) que corresponde al centro del efector final, este sistema es móvil y depende de la posición angular de los 3 motores, las coordenadas del centro del sistema de referencia se miden desde el sistema 0 y representan la solución al problema cinemático directo que se describe en el próximo apartado.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Cinemática directa.

En la cinemática directa, dada la configuración angular en las juntas de revoluta (unión del eje del servomotor y la) se determina la posición espacial (X, Y, Z) de la base móvil respecto a un sistema de referencia fijo.

Para establecer el modelo cinemático directo se empleó un método geométrico basado en la intersección de esferas. Los trabajos realizados en A. Olsson, et al. (2009), R. L. Williams (2016), son ejemplos de uso de este algoritmo para resolución del problema cinemático directo para este robot.

Como se mencionó en la sección 2, una característica de estos robots es que en la unión de los eslabones la y lb se produce una junta esférica, en tal junta se puede generar una esfera con centro donde se ubicó el sistema de referencia 2 con un radio de longitud lb.

Como el modelo para los otros dos sistemas articulados corresponde a la solución del primer sistema pero rotada en el eje Z, la esfera descrita anteriormente se genera para los otros dos casos, teniendo así un sistema que se puede modelar mediante 3 esferas de radio lb, por lo que el problema cinemático directo se reduce a determinar las coordenadas del centro de las 3 esferas y los puntos de intersección en el centro del efector final.

Para que las tres esferas se intersecten en el centro del efector final debe desplazarse su centro en una distancia r (representada en la figura 3) en dirección del eje Y. Una vez realizado este desplazamiento, las esferas se intersectan en E(X,Y,Z) y estas son las coordenadas del efector final respecto al sistema de referencia 0.

La ubicación del sistema 1 respecto al 0 tiene coordenadas dadas en (1).

$$A_i\,(0,R,0) \tag{1}$$

La ubicación del sistema 2 respecto al 0 tiene coordenadas dadas en (2).

$$B_i\,(0,R+l_a C\theta_i, l_a S\theta_i) \tag{2}$$

Desplazando (2) una distancia r en dirección de Y, se tiene:

$$B_i^{'}\,(0,R+l_a C\theta_i - r, l_a S\theta_i) \tag{3}$$

Lo anterior corresponde a las coordenadas del centro de la esfera i-ésima, para el caso de la esfera 1, i=1, representando como vector columna, se tiene:

$$B_1^{'}\begin{pmatrix} 0 \\ R+l_a C\theta_1 - r \\ l_a S\theta_1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

La rotación en el eje Z en un ángulo theta, viene dada por la siguiente expresión:

$$R_z(\theta)=\begin{pmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para determinar las coordenadas del centro para la esfera 2, se realizó la multiplicación matricial de la ecuación (5) con theta = 120º y la expresión (3) con i=2, se tiene:

$$B_2' \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}(R+l_a C\theta_2 - r) \\ -\frac{1}{2}(R+l_a C\theta_2 - r) \\ l_a S\theta_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Para determinar las coordenadas del centro para la esfera 3, se realizó la multiplicación matricial de la ecuación (5) con theta = 240º y la expresión (3) con i=3, se tiene:

$$B_3' \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(R+l_a C\theta_3 - r) \\ -\frac{1}{2}(R+l_a C\theta_3 - r) \\ l_a S\theta_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Teniendo las coordenadas de los centros para las tres esferas involucradas en el modelo y la longitud del radio (lb), para que las esferas se intersecten en E(X,Y,Z) se debe satisfacer el sistema de ecuaciones no lineales de segundo grado:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = l_b^2 \quad (8a)$$
$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = l_b^2 \quad (8b)$$
$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = l_b^2 \quad (8c)$$

Donde:
X1, Y1, Z1 son las coordenadas del centro de la esfera 1 dados en (4).
X2, Y2, Z2 son las coordenadas del centro de la esfera 2 dados en (6).
X3, Y3, Z3 son las coordenadas del centro de la esfera 3 dados en (7).

Para solucionar el sistema de ecuaciones, primero se desarrollaron los productos notables indicados, una vez desarrollados, se eligió una ecuación y se le restaron cada una de las otras dos, en este caso (8c)-(8a) y (8c)-(8b) para tener un sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas.

Tomando una de las incógnitas como parámetro, se resolvió el sistema de dos ecuaciones siendo ambas soluciones funciones de la incógnita seleccionada como parámetro, en este caso se eligió Z como parámetro, entonces se tienen soluciones de la forma: X=f(Z) y Y=f(Z).

Al ser ambas funciones de Z, se eligió la ecuación (8a), para sustituir ambas funciones de Z y de esta forma se tuvo una ecuación cuadrática dependiente sólo de Z, se resolvió empleando la fórmula general y admitiendo las soluciones en que Z es negativa, ya que las esferas se intersectarán en dos puntos, un punto de intersección es donde z es positiva y la otra donde es negativa, pero de acuerdo al sistema de referencia establecido inicialmente, la base móvil se sitúa en Z negativo y la geometría del robot sólo admite un sentido en el eje Z.

Una vez hallada la solución para Z, se hizo la sustitución en las funciones X=f(Z) y Y=f(Z),de esta forma se obtuvo la solución al sistema. Teniendo así el modelo matemático que describe la posición espacial como función de la configuración angular de los motores del robot, es decir, el modelo cinemático directo del robot.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Al realizar los cálculos se hicieron múltiples cambios de variable para de reducir el tamaño de las expresiones, se empleó cálculo simbólico mediante computadora para obtener los resultados.

4. Representación 3D en Matlab.

Con la finalidad de simular el comportamiento del robot, se hizo un modelo 3D en el entorno de Matlab tomando como base el modelo cinemático.

En la tabla 1 se presentan los valores utilizados para realizar la representación del robot. Se consideró R=150mm.

Parámetro	La	Lb	r	R (var)	x	y	z
Cantidad	110 mm	330 mm	50 mm	100 mm - 200 mm	0	0	-375

Tabla 1. Valores de parámetros para representación del robot.

En la figura 4 se representa el robot Delta, se estableció la longitud de los parámetros del robot medidos en milímetros, mediante simulación se pueden visualizar los cambios en la geometría del robot de acuerdo a la modificación de cualquiera de los parámetros implicados.

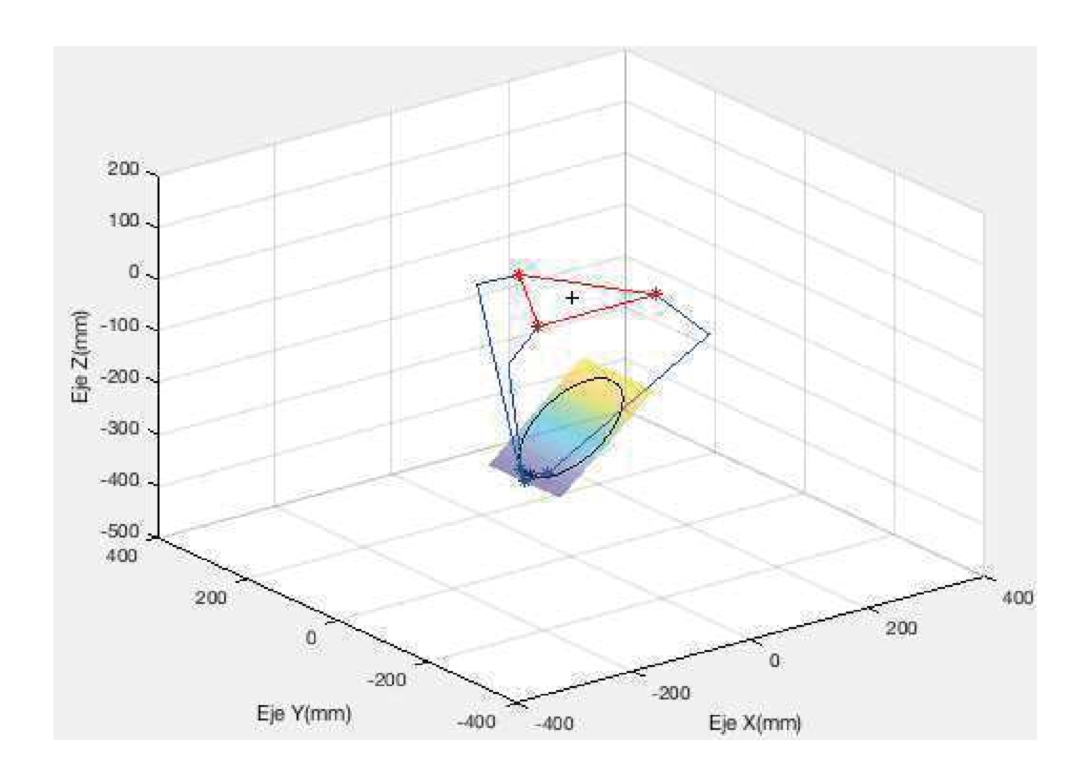


Figura 4. Robot Delta en Matlab.

Con ayuda de simulaciones se puede estimar el comportamiento real del robot, siendo una herramienta para selección de rutinas a realizar posteriormente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



5. Estudio de reconfiguración geométrica.

Una reconfiguración geométrica se refiere a modificar uno, varios o todos los parámetros, en ese caso del robot, los parámetros considerados son el angular, la, lb, R y r presentando en este trabajo la reconfiguración variando R.

El parámetro R, se acotó un intervalo de 100 a 200 mm, para acotar dimensiones de reconfiguración. Al modificar R, se fijó una posición para el robot, las longitudes la, lb y r permanecieron constantes para este estudio.

Se varió R entre 100 y 200 mm con los demás parámetros constantes y se evaluaron estos datos en el jacobiano del robot. Se eligió R entre 100 y 200 mm porque comprende un tamaño de base fija aceptable para la dimensión esperada del robot.

Sea **Xe** el vector que representa las coordenadas espaciales X,Y, Z del efector final respecto al sistema de referencia 0 y **q** el vector que contiene las derivadas de las coordenadas angulares, se tiene el jacobiano **J** en:

$$\frac{dX_e}{dt} = J\frac{dq}{dt} \tag{9}$$

Donde:

$$X_e = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$\frac{dq}{dt} = \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \tag{11}$$

Y se define el Jacobiano como:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{dX(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_1} & \frac{dX(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_2} & \frac{dX(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_3} \\ \frac{dY(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_1} & \frac{dY(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_2} & \frac{dY(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_3} \\ \frac{dZ(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_1} & \frac{dZ(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_2} & \frac{dZ(\theta_1,\theta_2,\theta_3)}{d\theta_3} \end{pmatrix} \tag{12}$$

El número de condición se define:

$$K = ||J|| \; ||J^{-1}|| \tag{13}$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 16, pp.192-201.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Siendo K función de 6 variables, tal que: $K(R, r, l_a, l_b, X_e, \theta_i)$

Donde ||J|| corresponde a la norma de Frobenius de la matriz jacobiana; la norma de Frobenius de J, se define como:

$$||J|| = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} |J_{ij}|^2} \qquad (14)$$

Variando el parámetro R evaluado en J en incrementos de 0.1mm en un intervalo definido, se realizó la gráfica para visualizar la tendencia; se determinó el número de condición K, para ello, se realizó un script en Matlab donde se realizaron las operaciones. En la figura (5) se representa el número de condición respecto a la variación del parámetro R.

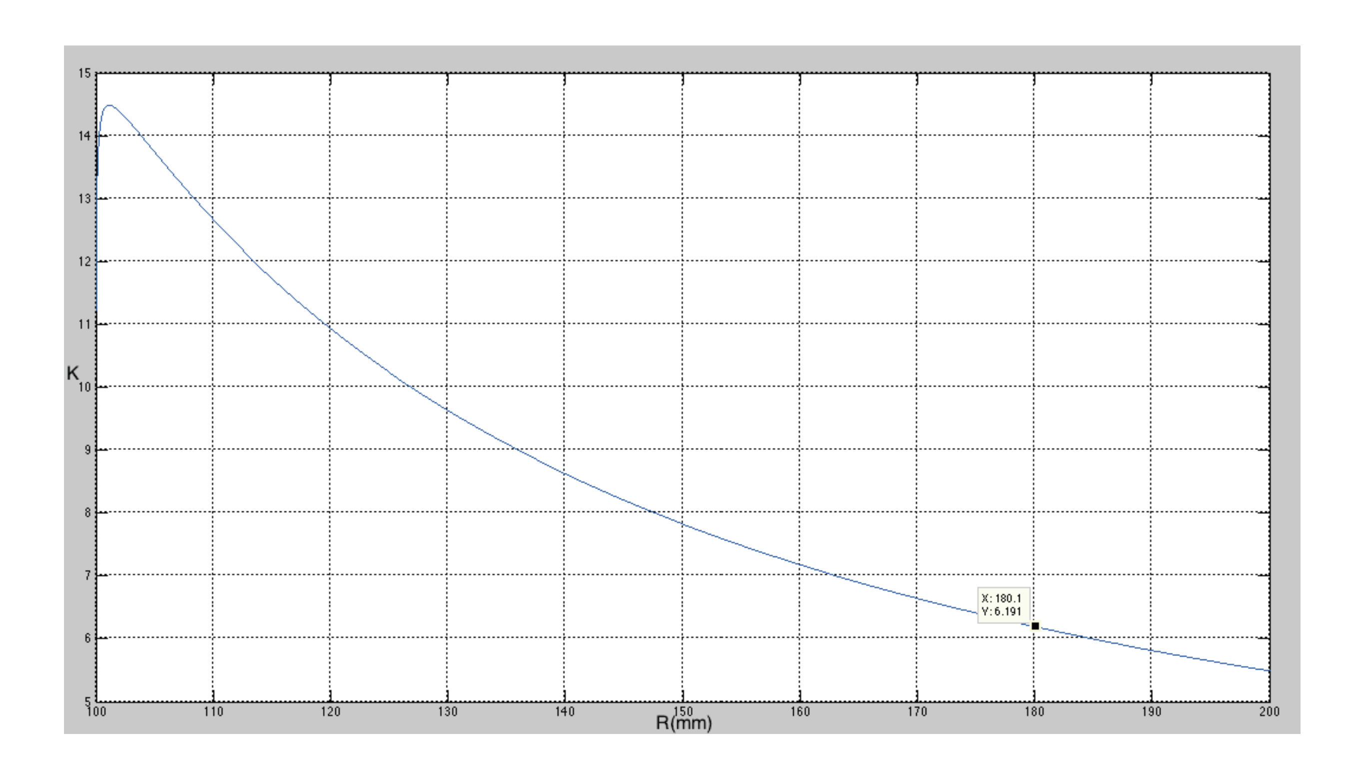


Figura 5. Número de condición respecto a la variación del parámetro R.

Se considera adecuado el número de condición que tienda a ser 1 ya que K es un factor de amplificación de error y k=1 es el valor mínimo dentro del espacio de trabajo del robot; se considera, además no afectar el espacio de trabajo del robot, ya que entre mayor es el valor de R, el espacio de trabajo tiende a reducirse y esto presenta complicaciones para los propósitos del robot porque se requiere un espacio de trabajo acorde a determinada aplicación y un espacio de trabajo que tienda a ser nulo no sirve en aplicaciones a escala macroscópica.

Teniendo estos resultados, fue rediseñada la base fija del robot, considerando un rango de dimensiones deseadas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



6. Conclusiones.

El presente trabajo se centró en el análisis y descripción del robot paralelo tipo Delta para implementar una técnica de reconfiguración geométrica basada en el número de condición de su matriz jacobiana definida mediante el análisis cinemático del robot.

Merlet propone como más apropiado un método basado en determinación de errores de posicionamiento máximo, sus valores promedio y varianza para el caso de un robot paralelo, pero se seleccionó la variación de R y determinación del número de condición ya que se ha reportado este estudio en otros trabajos y pese a no ser el método más óptimo, presenta mayor simplicidad matemática.

Si el número de condición tiende a infinito, tiende a su vez a ser una configuración singular, en cambio si tiende a uno, se mejora el desempeño cinetostático del robot, esto es debido a que K es un factor de amplificación de error y el valor mínimo de k para las normas de Frobenius y 2-norma es la unidad.

Al incrementar el valor de R, en el intervalo de 100 a 200 mm, el número de condición (K) tiende a la unidad cuando R aumenta, considerando esto se tuvo un criterio para diseño y construcción de la base fija del robot.

Se seleccionó un valor de R entre 110 y 130 mm como pauta para diseño; finalmente se eligió el valor de R=120 mm para la construcción de la base fija del robot.

Referencias

[1] M. Méndez. “Diseño de un robot paralelo”. ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería, ISSN-e 2339-3483, ISSN 1692-1798 Vol. 6, Nº 2, pp.29-35, 2009.

[2] V. Poppeová, J. Uríček, V. Bulej, P. Šindler. “DELTA ROBOTS – ROBOTS FOR HIGH SPEED MANIPULATION”. Technical Gazette, ISSN 1330-3651, UDC/UDK 681.51:004.896, Vol. 18, Nº 3, pp. 435-436. Žilina, Slovakia, 2011.

[3] R. Sánchez, J. Gonzáles, E. Castillo, A. Balmaceda. “Análisis del desempeño cinetostático de un robot paralelo tipo Delta reconfigurable”. Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. XVI, Nº 02 pp. 213-224, 2015.

[4] M. Maya, E. Castillo, A. Lomelí, E. González, A. Cárdenas. “Workspace and Payload-Capacity of a New Reconfigurable Delta Parallel Robot ”. International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10, pp.56, 2013.

[5] J.-P. Merlet. “Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots”. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, pp. 1-10, 2005.

[6] R. L. Williams II. “The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions ”. Ohio University, 2016.

[7] A. Olsson “Modeling and control of a Delta-3 robot ”. Department of Automatic Control. Lund University. MASTER THESIS. IISSN 0280-5316 ISRN LUTFD2/TFRT--5834--SE, 2009.

[8] H. Asada. “Introduction to Robotics. Department of Mechanical Engineering”. Massachusetts Institute of Technology. Chapter 5. Differential Motion, pp.1-10.

[9] A. Hamdallah, H. Alashqar. “Modeling and High Precision Motion Control of 3 DOF Parallel Delta Robot Manipulator”. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in Electrical Engineering. Gaza-Palestine. pp. 8-14, 2007.

[10] O. Hamdoun, L. Bakkali, F. Baghli. “Analysis and Optimum Kinematic Design of a Parallel Robot”. 10th International Conference Interdisciplinary in Engineering, INTER-ENG. Vol. 181, pp. 214-220, Morocco, 2017

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 17, pp.202-212.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Modelo y Simulación de un Brazo Robótico tipo Scara Utilizando Procesamiento de Imágenes y Splines para el Trazado de una Ruta

Altamirano Soria José Edgar, Ramírez Ángeles Iván Joel, Román Rivera Luis Rogelio y Vargas Soto José Emilio

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

Resumen

Un brazo robótico tipo SCARA (Selective Complican Assembly Robot Arm) permite trazar una ruta sobre la cual se pueden realizar diferentes aplicaciones como cortes, gravados e impresiones por mencionar algunas. El presente trabajo es una guía para modelar un brazo robótico tipo SCARA compuesto de tres grados de libertad, que permite simular la trayectoria que sigue el brazo para anticipar las capacidades y límites del diseño al trazar diferentes rutas. Se ejemplifica el modelo mediante el trazo de una ruta de una imagen previamente procesada usando splines cúbicas. El demo presentado se realiza en matlab sin embargo el modelo es de aplicación general. Se realiza un análisis cinemático inverso, para obtener los valores de los ángulos correspondientes a las articulaciones rotacionales, de acuerdo al punto (x,y) del plano donde se desee posicionar a la terminal del robot.

Palabras clave: scara, spline, procesamiento de imágenes, trayectoria.

1. Introducción

Un brazo robótico se compone de cierto número de eslabones unidos a través de articulaciones, que pueden ser prismáticas o rotacionales, como se muestra en la Figura 1, en forma de cadena cinemática abierta, donde los puntos inicial y final del brazo no se encuentran físicamente unidos.

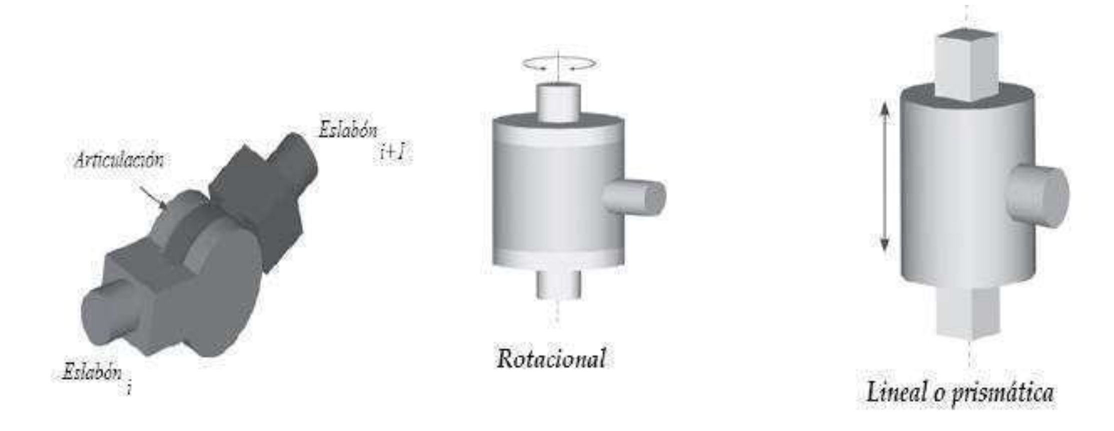


Figura 1. Tipos de articulaciones.

De acuerdo con el tipo de articulaciones presentes en el diseño en cinemática abierta del brazo, estos se pueden clasificar de acuerdo con la siguiente tabla:

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 17, pp.202-212.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Clasificación de brazo robóticos.

Robot		Características
Antropomórfico (RRR)		3 articulaciones rotacionales
SCARA (RRP)		2 articulaciones rotacionales y 1 prismática
Esférico (RRP)		2 articulaciones rotacionales y 1 prismática
Cilíndrico (RPP)		1 articulación rotacional y 2 prismáticas
Cartesiano (PPP)		3 articulaciones prismáticas

En este trabajo se implementa la modelación y simulación de un brazo robótico tipo SCARA como se muestra en la Figura 2, que cuenta con dos articulaciones rotacionales y una prismática, por lo que el movimiento descrito por los segmentos del brazo, a los que corresponden los ángulos rotacionales, se puede representar en planos bidimensionales dado que la tercera articulación es prismática y solo presenta un movimiento lineal a lo largo del eje z.



Figura 2. Robot SCARA

En Robótica, la Cinemática inversa (I.K por sus siglas en ingles) es la técnica que permite determinar el movimiento de una cadena de articulaciones para lograr que un actuador final se ubique en una posición concreta. El problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot q = [q1, q2, . . . , qn] según la posición que se desea que tenga el extremo del brazo.

La idea principal del trabajo es poder presentar un modelo de un robot tipo SCARA que permita trazar la ruta exterior de una imagen umbralizada, esto gracias a el área de procesamiento de imágenes. Aunque el objetivo del trabajo es presentar el funcionamiento, nos limitamos a presentar el análisis de la cinematica inversa y el splines y no profundizamos en el tema de procesamiento de imágenes debido al amplio tema que abarca.

2. Antecedentes

Existen varias implementaciones de Robots tipo Scara que siguen cierta trayectoria definida por una función determinada. En algunos casos se tiene un análisis de 5 o más grados de libertad en

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 17, pp.202-212.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



donde se considera el comportamiento de los actuadores que se usaran en la implementación fisica, como en el caso de Kern, que simula y modela un robot tipo SCARA con 5 grados de libertad en donde incluye el modelo dinámico de los actuadores y valida su sistema mediante el seguimiento de una trayectoria dada por una función continua [2].

Otras implementaciones buscan mejorar el tiempo de computo requerido para el cálculo de las posiciones de las articulaciones (modelo cinemático inverso), este es el caso de Noriega, que presenta una formulación para la resolución de la cinemática inversa para un robot tipo Scara, en donde toma en cuenta la posición, velocidad y aceleración para el desarrollo del modelo. El robot sigue una trayectoria definida por una función [3].

Diversas aplicaciones fueron dadas a los modelos hechos del robot Scara. En el 2016, Villarreal, presenta el diseño de una arquitectura de control abierta con fines didácticos. El robot Scara es capaz de seguir una trayectoria y su principal objetivo es que los estudiantes puedan hacer pruebas con el robot [4]. Otra aplicación fue desarrollada por Pillajo, en la que la trayectoria que sigue el robot tipo Scara es controlado por medio de los datos obtenidos por un sensor Kinect. El Kinect interpreta los movimientos del brazo del usuario para ajustar la posición del actuador final del robot [5].

3. Análisis cinemático inverso

Los ángulos y distancias que se toman en cuenta en el análisis cinemático inverso del robot SCARA a simular, se muestran en la siguiente figura:

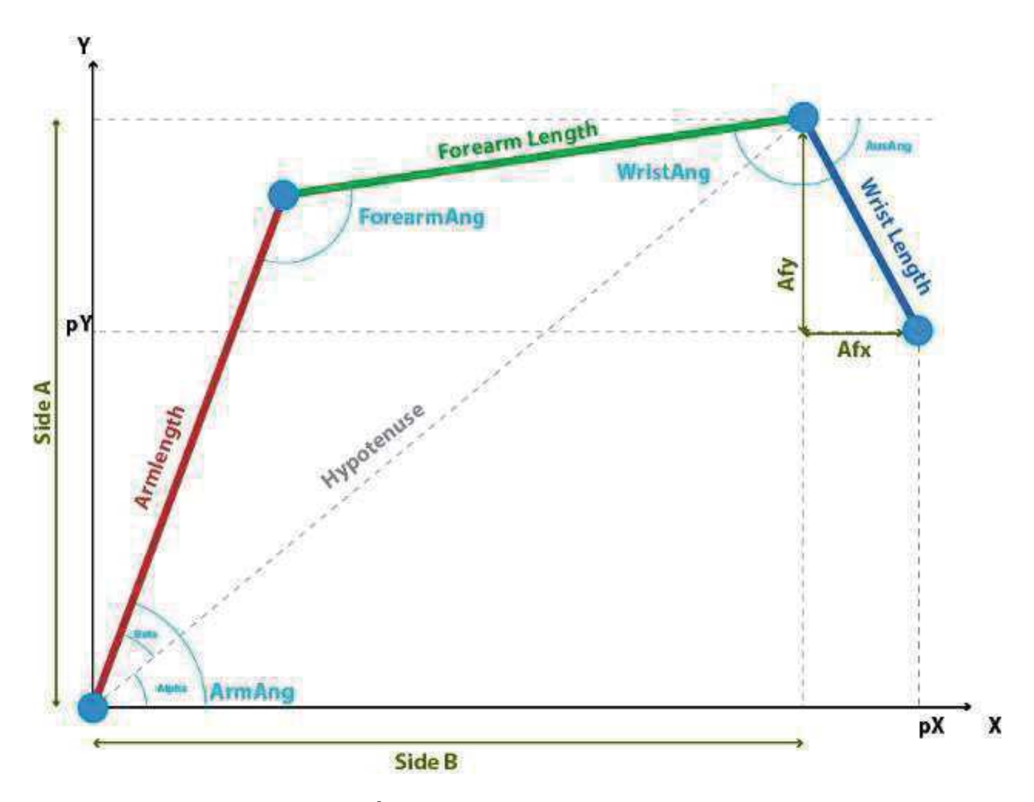


Figura 3. Ángulos y dimensiones del modelo

Las variables X e Y, representan las coordenadas en las que se debe posicionar la terminal del brazo, por lo que sus valores son previamente conocidos al análisis cinemático inverso, dado que los ángulos de las articulaciones dependerán de estos valores. La longitud del brazo (Armlength), longitud del antebrazo (ForearmLength) y la longitud de la muñeca (WristLength), son distancias constantes conocidas, es decir, su valor no varía durante la simulación. Así mismo, el ángulo de cabeceo

ISBN: 978-607-9394-14-1.



(AuxAng), es otro valor constante conocido y tiene la finalidad de orientar el terminal, es decir, posicionar el objeto que se encuentra en el punto final con un ángulo determinado.

A continuación, se desarrolla el análisis matemático para la obtención de los ángulos de las articulaciones (ArmAng, ForearmAng, WristAng), en función de las aristas que las unen (Armlength, ForearmLength, WristLength).

$$Afx = \cos(AuxAng) * \text{WristLength} \quad (1)$$

$$SideB = X - Afx \quad (2)$$

$$Afy = \text{sen}(AuxAng) * \text{WristLength} \quad (3)$$

$$SideA = Y + Afy \quad (4)$$

Aplicando el teorema de Pitágoras:

$$Hypotenuse = \sqrt[2]{SideA^2 + SideB^2} \quad (5)$$

$$Alpha = tan^{-1}(\frac{SideA}{SideB}) \quad (6)$$

Aplicando la ley de cosenos

$$\text{ForearmLength}^2 = \text{Armlength}^2 + hypotenuse^2 - 2 * \text{Armlength} * hypotenuse * \cos(Beta)$$

$$Beta = cos^{-1}(\frac{\text{ForearmLength}^2 - \text{Armlength}^2 - Hypotenuse^2}{-2 * \text{Armlength} * Hypotenuse}) \quad (7)$$

$$ArmAng = Alpha + Beta \quad (8)$$

Aplicando ley de cosenos

$$\text{ForearmAng} = cos^{-1}(\frac{\text{ForearmLength}^2 + ArmLength^2 - Hypotenuse^2}{2 * ArmLength * \text{ForearmLength}})$$

$$\text{WristAng} = AuxAng - ArmAng - \text{ForearmAng} \quad (9)$$

4. Procesamiento de Imagen

Inicialmente contamos con una imagen que se desea procesar. Es importante, que se cuente con un fondo que contraste con la imagen, para que el proceso de umbralización sea mucho más eficiente. La imagen que utilizaremos se muestra en la Figura 4.

El rango del umbral es definido como una variable al iniciar el programa, en un futuro desarrollo este valor será definido automáticamente para evitar la intervención humana.

Una vez que el proceso de umbralización haya sido satisfactorio, se procede a utilizar un algoritmo propio para la detección de bordes de la imagen. En la Figura 5 se muestra el resultado de umbralización y detección de bordes.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 4. Imagen del contorno de una mano

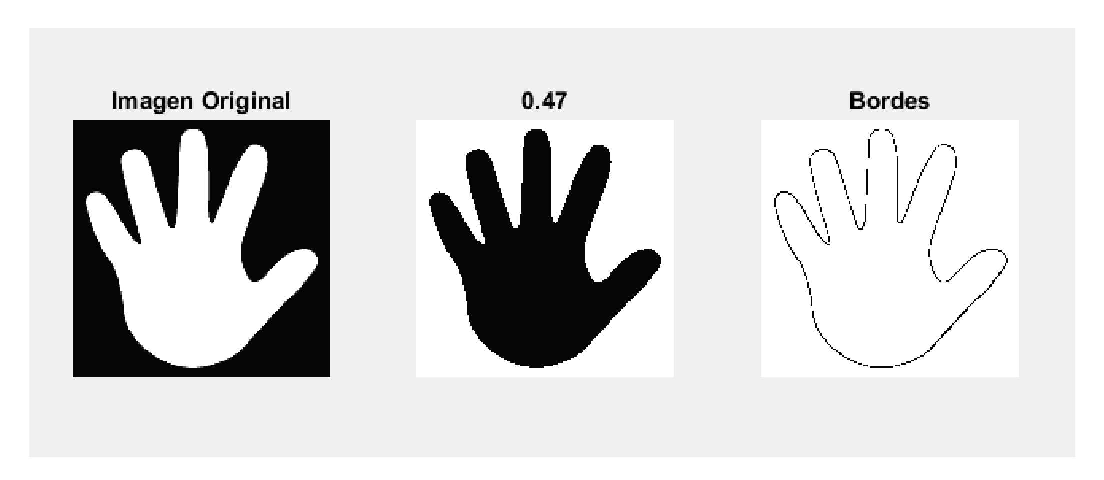


Figura 5. Resultados de la umbralizacion.

Para el ordenamiento de los puntos ordenados, se trabajo un algoritmo propio para obtener los puntos ordenados en sentido de las manecillas del reloj.

5. Análisis de SPLINE

Una de las razones para implementar el spline, es ahorrar memoria y ofrecer un mejor aproximamiento a la imagen en caso de que cambie de tamaño y evitar el efecto de pixelado como se muestra en la Figura 6.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 6. Imagen con efecto pixelado.

La ventaja de los splines es que no presentan este efecto. A continuación, se explica mediante un ejemplo el funcionamiento de la spline cubica. Dados 3 puntos {(5,5), (7,2), (9,4)} se requiere una curva que pase por todos los puntos.

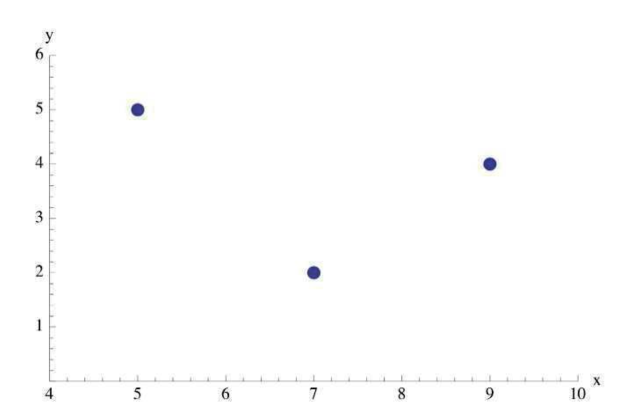


Figura 7. Representación grafica de los puntos.

Para lo cual se requieren dos ecuaciones cúbicas, una por intervalo entre 2 puntos.

$$S_0(X) = a_0 + b_0(x-5) + c_0(x-5)^2 + d_0(x-5)^3 \tag{12}$$

$$S_1(X) = a_1 + b_1(x-7) + c_1(x-7)^2 + d_1(x-7)^3 \tag{13}$$

Debido a que hay 8 coeficientes, se deben de resolver 8 ecuaciones. Los splines deben de coincidir con la función (coordenada “y”) en los puntos (coordenada ¨x¨).

$$5 = S_0(5) = a_0 \tag{14}$$

$$2 = S_0(7) = a_0 + 2b_0 + 4c_0 + 8d_0 \tag{15}$$

$$2 = S_1(7) = a_1 \tag{16}$$

$$4 = S_1(9) = a_1 + 2b_1 + 4c_1 + 8d_1$$

La primera y segunda derivada de las ecuaciones cubicas se representan en las fórmulas 17 y 18.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$S'_0(7) = b_0 + 4c_0 + 12d_0 = b_1 = S'_1(7) \quad (17)$$

$$S''_0(7) = 2c_0 + 12d_0 = 2c_1 = S''_1(7) \quad (18)$$

Las dos ecuaciones finales provienen de las dos condiciones de los límites o extremos, y se representan en las fórmulas 19 y 20.

$$S''_0(5) = 0 = 2c_0 \quad (19)$$

$$S''_1(9) = 0 = 2c_1 + 12d_1 \quad (20)$$

Las 8 ecuaciones juntas forman el siguiente sistema:

$$5 = a_0 \quad (21)$$

$$2 = a_0 + 2b_0 + 4c_0 + 8d_0 \quad (22)$$

$$2 = a_1 \quad (23)$$

$$4 = a_1 + 2b_1 + 4c_1 + 8d_1 \quad (24)$$

$$0 = b_0 + 4c_0 + 12d_0 - b_1 \quad (25)$$

$$0 = 2c_0 + 12d_0 - 2c_1 \quad (26)$$

$$0 = 2c_0 \quad (28)$$

$$0 = 2c_1 + 12d_1 \quad (29)$$

La solución al sistema se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Solución al sistema de ecuaciones

i	*ai*	*bi*	*ci*	*di*
0	5	-17/8	0	5/32
1	2	-1/4	15/16	-5/32

La curva spline natural puede ser expresada como:

$$S(x) = \begin{cases} 5 - \frac{17}{8}(x-5) + \frac{5}{32}(x-5)^3, 5 \leq x \leq 7 \\ 2 - \frac{1}{4}(x-7) + \frac{15}{16}(x-7)^2 - \frac{5}{32}(x-7)^3, 7 \leq x \leq 9 \end{cases} \quad (30)$$

La Figura 8 muestra los puntos de la figura 7, unidos por las ecuaciones obtenidas de la spline cubica.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



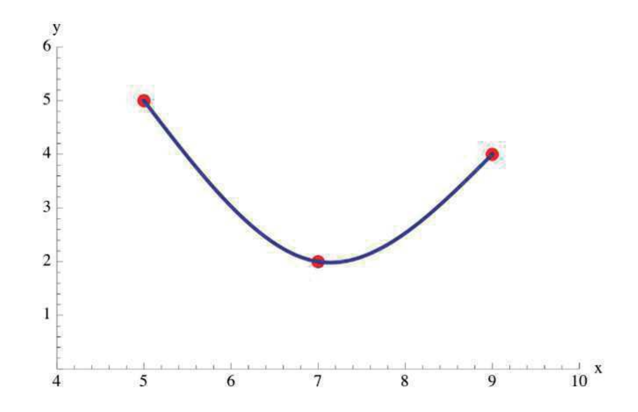


Figura 8. Representacion grafica de la interpolación.

6. Simulación

El diagrama de flujo presentado en la Figura 9, presenta la metodología seguida para la resolución del modelo del brazo robótico SCARA.

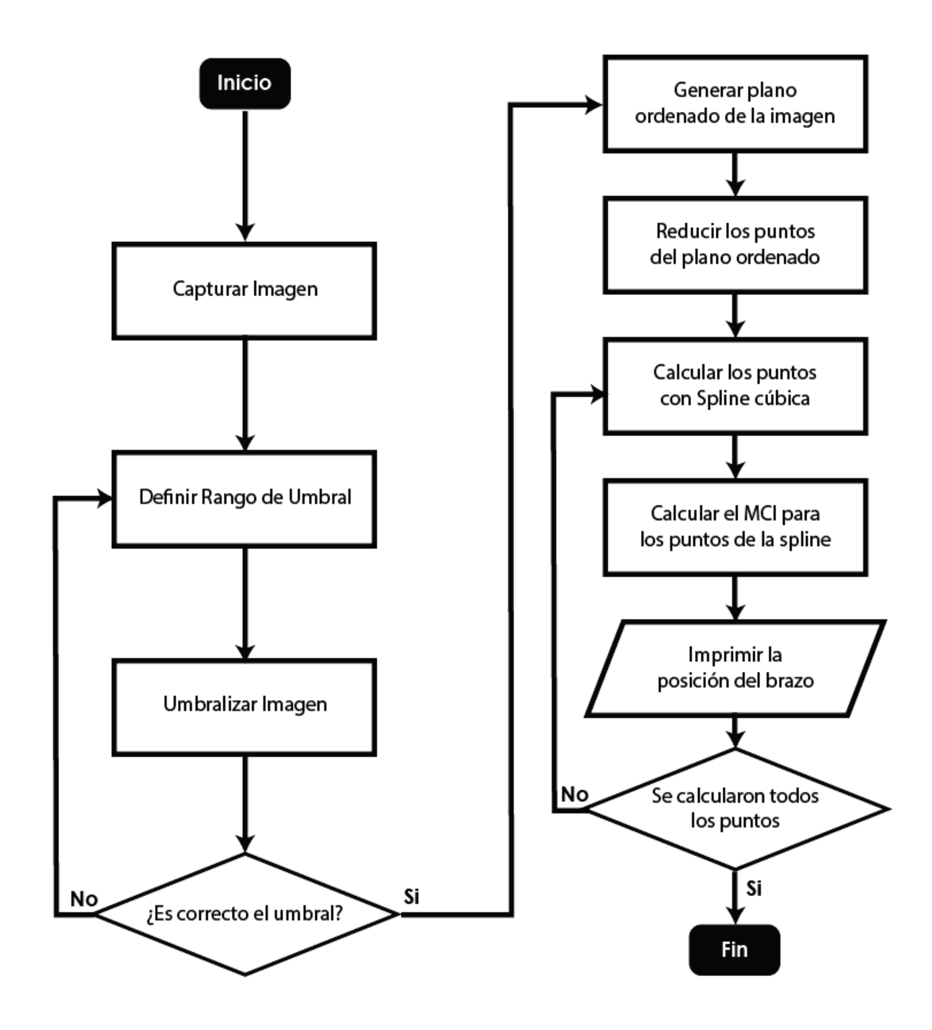


Figura 9. Diagrama de Flujo del Proceso



Inicialmente se tienen que definir la longitud de los segmentos del brazo robotico: brazo, antebrazo y muñeca. Posteriormente se carga la imagen como una matriz de puntos para poder realizar el calculo del spline para cada segmento de la imagen. Finalmente se calcula el modelo cinematico inverso para cada punto que haya regresado el spline cubico.

7. Resultados

El modelo resultante se aplico a la imagen de la mano (figura 10) pero para apreciar mejor el uso de las splines se presenta la figura 11, que representan 6 puntos en el espacio.

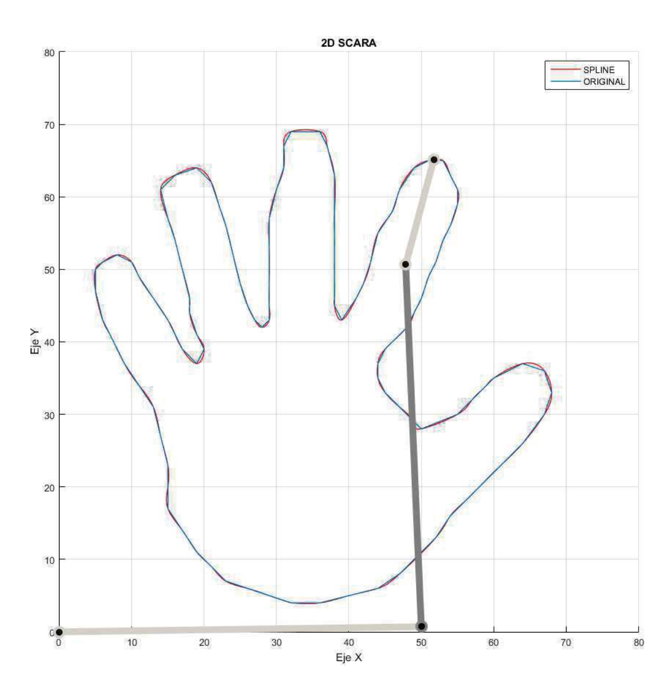


Figura 10. Resultados de la modelación con la imagen inicial.

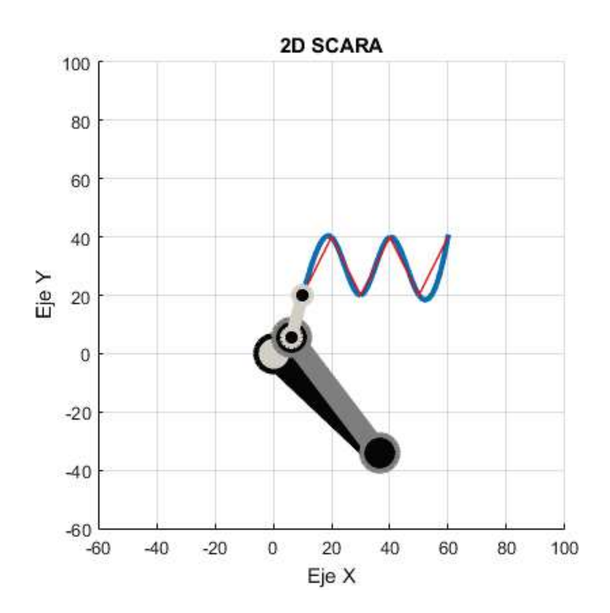


Figura 11. Comparacion de los puntos distribuidos con una SPLINE



Para calcular el error de la spline contra los puntos originales se utilizo la suma de error al cuadrado (RSS), y el valor de la media cuadrática (RMS). En la figura 12 se muestra el área de error y en la tabla 3 los valores obtenidos para cada técnica.

Tabla 3. Valores de la suma del error al cuadrado y media cuadrática

RSS	*RMS*
1.7174478151215e-09	6.2108759834023e-11

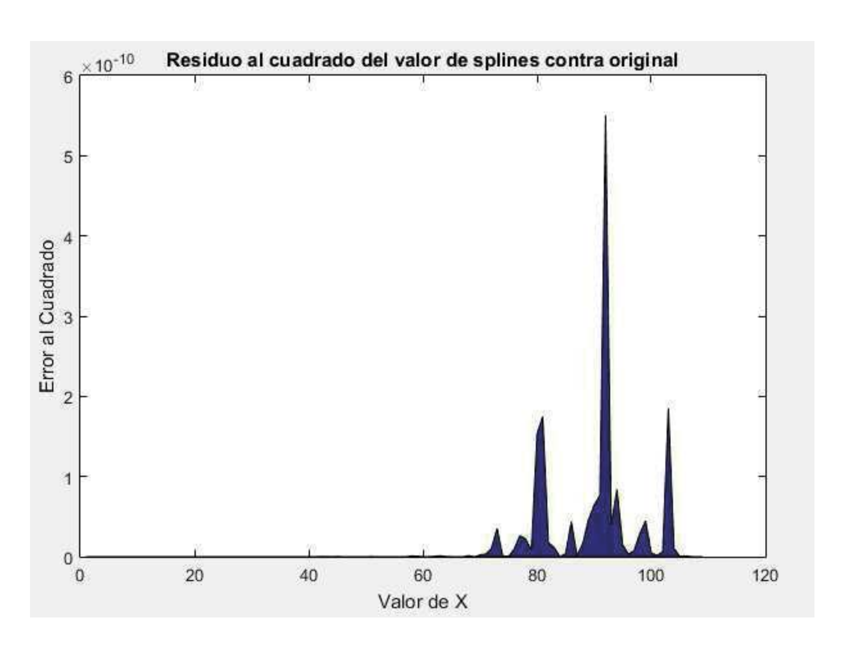


Figura 12. Representación visual de la suma del error al cuadrado

Es importante aclarar que este procedimiento funciona solamente para los bordes exteriores de las imágenes, si se desea procesar alguna imagen con algún borde interior, esta debe ser tratado como un nuevo objeto.

La ventaja de poder utilizar splines, es que el procesamiento de la imagen es menor al tener inicialmente menos puntos que calcular.

8. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el modelo y simulación de un brazo robótico tipo SCARA en 2 dimensiones utilizando SPLINE cúbica como método de mejora para el suavizado de la imagen trazada. El modelo realiza un recorrido de la imagen siguiendo la trayectoria y calculando cada posición del brazo mediante cinemática inversa. El presente trabajo propone una alternativa para la impresión de imágenes físicamente realizando operaciones que no requieran de un gran poder de computo. Actualmente el uso de esta técnica puede ser llevada desde maquinas de suajes, impresión o técnicas de uso médico.

9. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se puede implementar una 3ra dimensión en la posición del brazo, permitiendo realizar rutas en 3 dimensiones.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Referencias

[1] Reyes F., *MATLAB aplicado a Robotica y Mecatronica*. 2012.

[2] J. Kern and C. Urrea, “Modelamiento y simulación de un robot redundante de tipo manipulador SCARA,” *Am. J. Phys. Educ*, vol. 5, no. 4, 2011.

[3] A. Noriega González, A. García Martínez, and M. Muñiz Calvente, “Resolución del problema cinemático inverso en un robot SCARA mediante grupos de Assur.”

[4] M. G. Villarreal-cervantes, D. De-la-cruz-muciño, J. S. Pantoja-garcía, and G. Sepúlveda-cervantes, “Arquitectura de control abierta por medio de una PC para sistemas mecatrónicos,” vol. 54, pp. 17–24, 2016.

[5] C. Pillajo and J. E. Sierra, “Human Machine Interface HMI using Kinect sensor to control a SCARA robot,” *2013 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2013 - Conf. Proc.*, pp. 1–5, 2013.

[6] Buchanan, J. Robert. "Cubic Spline Interpolation." MATH 375, Numer Anal (2010).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 18, pp. 213-222.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Construcción de Dispositivo Inalámbrico para Medición de Fuerza de Agarre de Mano Humana

Duarte Rabelo Itzayana (1), Morales Sánchez Eduardo (1) y Quintero Valdez Guadalupe (2)

[1]Instituto Politécnico Nacional. CICATA-IPN. Cerro Blanco No. 141. C.P. 76090, Qro, Qro, Mex.
[2]Universidad de Celaya. Carretera Panamericana km 269, Rancho Pinto, CP. 38080 Celaya, Gto
Email: itzi.duarte.r@gmail.com

Resumen

En este trabajo se reporta la construcción de un dispositivo inalámbrico para medir la fuerza que aplica cada uno de los dedos de la mano humana durante el agarre. Este dispositivo se desarrolla con el objetivo de tener un sistema de medición de fuerza inalámbrico que pueda adaptarse no solo a una mano humana para tareas de rehabilitación, sino a una prótesis o un manipulador con dígitos, ya que en su mayoría estas carecen de un sistema de sensado que permita al usuario monitorear la fuerza de agarre. El dispositivo consta de un guante con un arreglo de cinco sensores piezoresistivos ubicados a la altura de la falange distal (yema de los dedos). Los sensores piezoresistivos fueron calibrados utilizando un equipo analizador de textura, mediante el cual se aplicaba una fuerza conocida sobre el área activa del sensor, de esta manera se obtuvo la relación entre el voltaje de los sensores y la fuerza en Newtons. Se utilizó una plataforma Arduino para la adquisición de los voltajes de los sensores piezoresistivos y su conversión a Newtons. Los valores de fuerza se enviaron por medio de Bluetooth (BT) a una PC. En LabVIEW se diseñó un instrumento virtual que recibe por BT los datos de fuerza de cada uno de los sensores graficándolos de forma separada. Así mismo, se diseñó una aplicación en Android para visualizar el comportamiento de los sensores. El resultado obtenido es un dispositivo inalámbrico medidor de fuerza de agarre de cada dedo de la mano humana.

Palabras clave: Fuerza, piezoresistivo, falange.

1. Introducción

La medición de fuerza dactilar permite determinar la fuerza mínima necesaria para suspender, elevar o mover objetos de alguna posición especifica. La fuerza dactilar corresponde a medir la fuerza que aplican cada una de las falanges de los dedos de la mano en un acto de agarre. Los movimientos de la mano se dividen en dos grupos principales: movimientos de prensión y de no prensión. En los movimientos de prensión un objeto es capturado y mantenido parcial o totalmente dentro de la cavidad de la mano, mientras que en los movimientos no prensiles no se trata de agarrar o sostener un objeto si no de empujarlos con la mano completa o con los dedos de forma individual. A su vez se determinan dos tipos de agarre pinza principales: agarre de fuerza y de precisión [1]. Existen dispositivos que son capaces de medir la fuerza de agarre digital o multidigital que involucran necesariamente la fuerza que aplican las falanges distales. La principal aplicación de estos dispositivos es su uso para rehabilitación ortopédica, pues ayudan a cuantificar la presión ejercida por los dedos de la mano en ciertos procedimientos y para el estudio de síndromes como el de túnel carpiano, túnel cubital y síndrome de movimientos repetitivos. El dispositivo más común para medir fuerza dactilar y fuerzas de agarre de la mano humana es el dinamómetro digital, sin embargo, se han desarrollado otros dispositivos electrónicos que son capaces de medir la fuerza mediante arreglos de sensores de fuerza resistivos [2] [3] [4] con el propósito de conocer la fuerza aplicada por los dedos de la mano en diferentes tipos de movimientos prensiles. En la literatura también aparecen aplicaciones donde se adaptan sensores de fuerza tanto la falange distal como proximal en cada uno de los dedos

ISBN: 978-607-9394-14-1.



de una prótesis de mano para medir la fuerza que se aplica al momento de agarrar objetos y comparar las fuerzas de contacto de una mano natural y de una mano prostética [5].
.

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema inalámbrico para sensado de fuerza dactilar utilizando un arreglo de cinco sensores piezoresistivos, un controlador ATmega328p para adquisición y conversión de datos y módulo Bluetooth para establecer la comunicación inalámbrica con la computadora. Se propone de igual manera una interfaz en LabVIEW y una aplicación Android donde se visualizarán los datos de fuerza de forma gráfica. El objetivo es reducir las conexiones alámbricas, que el dispositivo sea portable y a su vez autónomo sin necesidad de permanecer conectado a una computadora para energizar o transmitir información.

2. Desarrollo

Para la medición de fuerza se utilizaron cinco sensores piezoresistivos MF01, los cuales se colocaron dentro de un guante de nylon y poliéster a la altura de la falange distal de cada dedo. Para la visualización de la fuerza aplicada por cada dedo se diseñó un instrumento virtual en LabVIEW y una aplicación para sistema Android. El instrumento virtual puede ser ejecutado de forma inalámbrica o alámbrica.

2.1 Diseño electrónico

El diseño electrónico está basado en cinco sensores de fuerza MF01, acondicionados con circuitos divisores de tensión. El sensor de fuerza utilizado tiene las siguientes características eléctricas [6]:

- Rango de sensibilidad: 0.1N a 100N.
- Repetibilidad: ±2%.
- Resistencia sin carga: 10MΩ.
- Tiempo de respuesta: <3 microsegundos.
- Tiempo de vida: 10 millones de impactos.

Con lo anterior se puede definir que el controlador requiere de 5 canales analógicos disponibles para la adquisición de las señales analógicas. En la figura 1 se puede observar el esquemático del diseño eléctrico desarrollado en PROTEUS. En este esquemático también se incluye la conexión del módulo bluetooth HC-05 que actúa como dispositivo esclavo para enviar los datos adquiridos a la PC para su posterior conversión a unidades de fuerza. La ventaja de utilizar bluetooth es que se evitan las conexiones alámbricas a la computadora lo que suele limitar la distancia a la cual el dispositivo se puede operar. El bluetooth utilizado da la ventaja de poder transmitir datos a cualquier dispositivo emparejado con una distancia de máximo 10 metros.

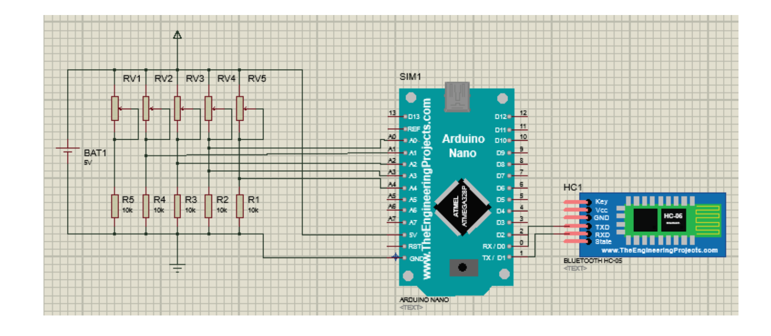


Figura 1. Esquema de conexiones en PROTEUS.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se calcularon algunas características eléctricas del circuito como la corriente consumida y la potencia. La corriente consumida por los sensores en total, considerando que el voltaje de entrada es de 5V, es de 2.5 microamperios. Si a este valor de corriente le agregamos la corriente consumida por el controlador y por el módulo bluetooth se tiene un total de 65 miliamperios de consumo total de corriente.

Para calibrar al medidor de fuerza desarrollado se obtuvo la ecuación que relaciona a la fuerza con el voltaje, se aplicó una fuerza conocida sobre el área activa del sensor y se midió el voltaje resultante al momento de la prensión. Lo anterior se realizó con ayuda de un analizador de texturas, el cual aplica una fuerza definida por el usuario a través de una sonda de Nylamid o de Aluminio. Se tomaron alrededor de 100 lecturas y se graficaron los promedios. Para obtener la función matemática que representa la relación entre fuerza y voltaje se realizó una regresión lineal utilizando la función Polyfit de MATLAB. Como resultado, se obtiene una aproximación polinómica de orden 2 (ecuación 1).

$$y = 133.2x^2 + 927.3x + 1625.6 \quad (1)$$

La figura 2 muestra los datos experimentales y el ajuste realizado a la curva de fuerza contra voltaje. Se puede observar la respuesta del sensor en un rango de 10N a 70N. Este rango se tomó por qué no se quiso llevar al límite máximo al sensor.

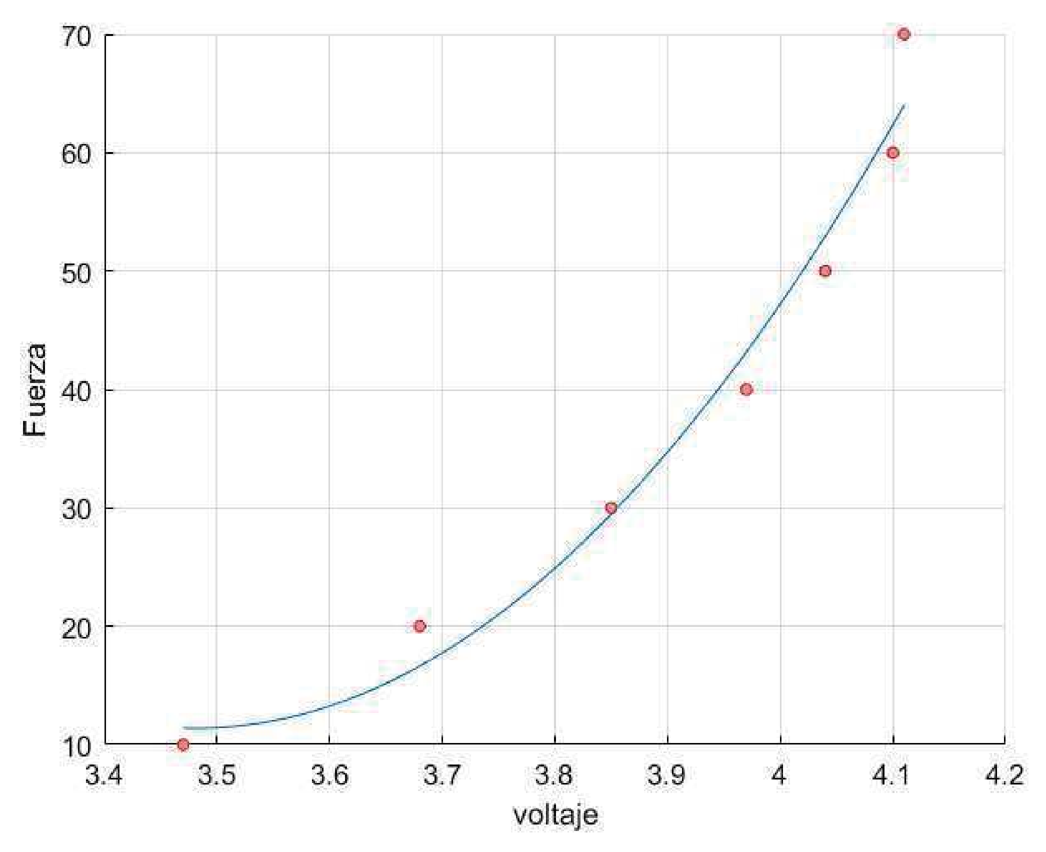


Figura 2. Datos experimentales y modelados de los datos de fuerza vs voltaje.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La ecuación 1 es la que se implementara en el microcontrolador para determinar la fuerza en Newtons cada vez que el sensor sea presionado. El diámetro en el cual el sensor puede medir es de 9 mm, fuera de esta dimensión el sensor no será capaz de realizar mediciones.

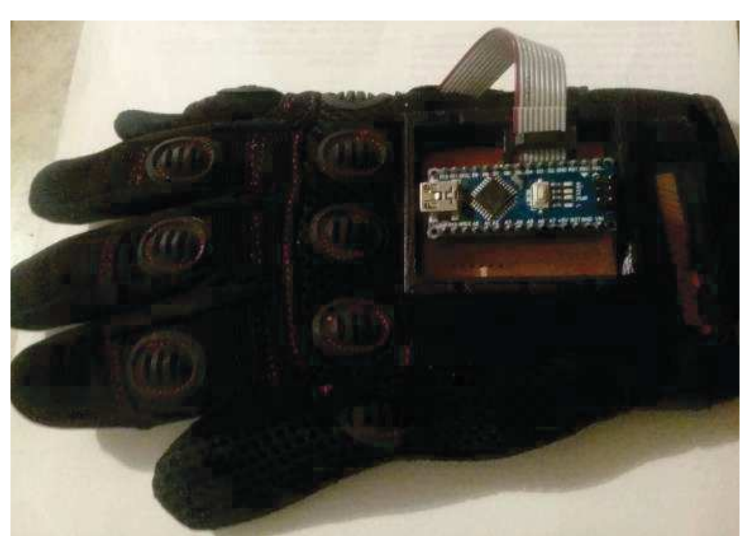
2.2 Construcciòn del sistema de sensado

El sistema de sensado construido consta de un guante de material sintético cuya forma de ajuste a la muñeca es por medio de velcro. Los sensores se colocan a la altura de la falange distal dentro del mismo guante, de esta forma se mide la fuerza aplicada por los dedos de la mano humana al momento del agarre o prensión. En la figura 3 se puede observar el guante y los sensores MF01 internos.



Figura 3. Guante con los sensores FSR402.

Después de realizar el montaje de los sensores, se realizó una placa impresa donde se integran los circuitos de sensado y adquisición. Los circuitos son montados en la parte posterior de la palma, con la finalidad de que los dedos y la palma queden libres para hacer tareas de sujeción y prensión. En la figura 4 se puede observar el montaje completo del guante y los circuitos electrónicos.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 4. Guante con PCB integrado.

2.3 Comunicación inalambrica con LabVIEW.

El sistema de medición de fuerza tiene dos formas de ser operado, por Bluetooth hacia la computadora a través de un instrumento virtual de LabVIEW y con una aplicación Android. Para la comunicación inalámbrica con LabVIEW hay dos modos de ejecución, individual y automática. En la ejecución automática se leen los cinco canales analógicos de forma secuencial, graficando la respuesta de todos los sensores. Por otro lado, en el modo de ejecución manual se le permite al usuario decidir que sensor leer y graficar según sea su interés. Cabe mencionar que para la comunicación con LabVIEW el controlador unicamente funge como dispositivo de adquisición de datos, no realiza ninguna operación matemática a excepción de la conversión a voltaje.

La selección del modo de ejecución se puede controlar desde el panel frontal o interfaz de usuario diseñada con el proposito de brindar información acerca del comportamiento de los sensores piezoresistivos caracterizados propiamente para medir la fuerza de agarre de la mano humana. En la figura 5 se puede observar el panel frontal diseñado.



Figura 5. Interfaz de usuario para control y monitoreo del sistema de medición de fuerza.

Además de realizar el monitoreo, la programación está diseñada para que todos los datos leidos de fuerza durante cierta cantidad de tiempo puedan ser guardados en un archivo de texto con extensión xlsx. Se observa que la interfaz de usuario de la figura 4 tiene cinco graficas, una por cada dedo de la mano, un boton de paro, un control de tiempo de ejecución, un led indicador que enciende cuando se está guardando información, cinco botones para uso del modo manual, indicadores numericos para la fuerza medida, y el control para selección del puerto COM.

2.4 Interfaz de usuario con Android

Si bien monitorear los datos de los sensores en LabVIEW resulta ser eficaz, igual de importante es la portabilidad del dispositivo, razón por la cual se desarrolló una aplicación para sistema Android [7]. Esta aplicación solamente recibe los datos de fuerza de los sensores por BT y los grafica. Parte de

ISBN: 978-607-9394-14-1.



la versatilidad de la aplicación es que puede funcionar tanto para celular como para tableta. La interfaz es interactiva, no tiene ninguna complejidad por lo que cualquier persona podria manipularla sin problema alguno. La aplicación fue desarrollada en app inventor utilizando el lenguaje scratch para realizar la programación. Este tipo de lenguaje de programación visual fue desarrollado por el MIT y es ideal para el desarrollo de aplicaciones sencillas, su código es open source por lo cual existe gran cantidad de información y manuales para comprenderlo. App Inventor tiene dos ventanas de desarrollo, una ventana donde se diseña la aplicación y otra ventana donde se desarrolla el código scratch de programación para las tareas especificas. En la figura 6 se puede observar la aplicación diseñada.

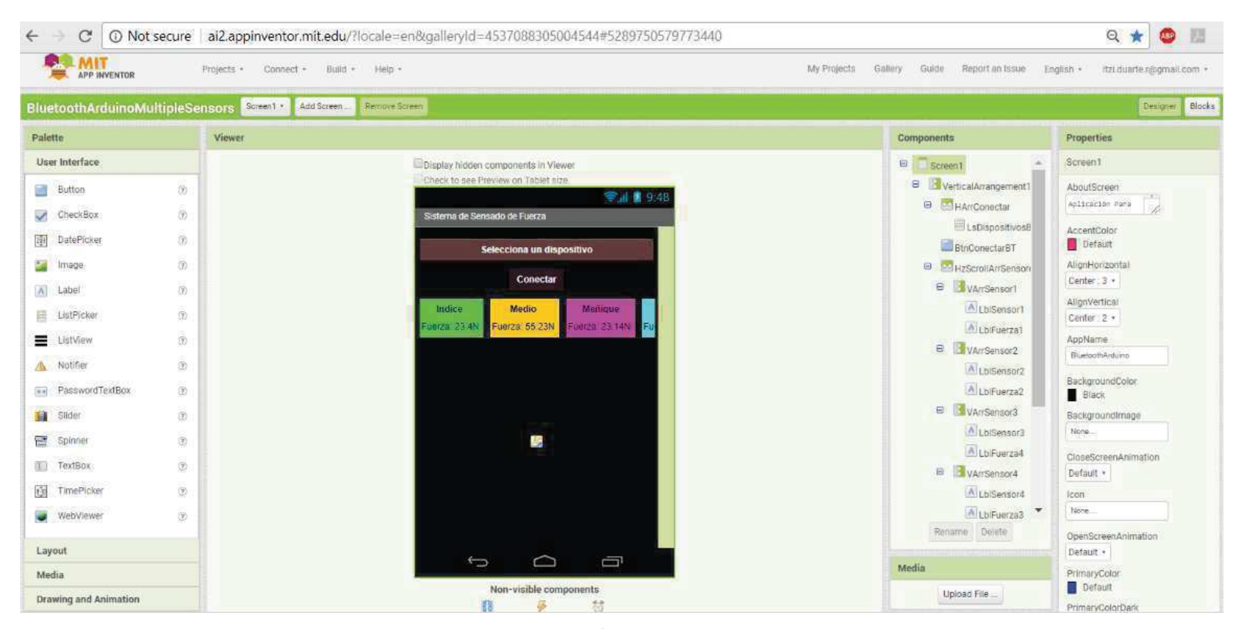


Figura 6. Diseño de la interfaz de usuario en App Inventor.

Como puede observarse hay cinco indicadores numericos que muestran el valor de la fuerza en Newtons de forma numerica, ya que en las gráficas esto no puede observarse. Dentro de la aplicaciòn tambièn se encuentra un botón para seleccionar el dispositivo bluetooth vinculado con el dispositivo y un botón para iniciar la conexión. Los indicadores nùmericos estàn colocados de forma scroll por lo cual para ver el cuarto y quinto indicador se requiere deslizar el bloque donde se alojan los indicadore numericos de fuerza.

3. Resultados

Se construyó un dispositivo medidor de fuerza de agarre de mano humana inalámbrico que puede trabajar en dos diferentes aplicaciones: Android y LabVIEW. El sistema mide hasta 70 Newtons lo equivalente a 7 kilogramos. Fuera del rango el dispositivo no será capaz de realizar la medición ya que la ecuación limita el rango de medición de los sensores.

En la figura 7 se puede ver la aplicación en Android funcionando y en la figura 8 se puede apreciar la interfaz de LabVIEW en ejecución. La aplicación en Android puede funcionar tanto para tableta como para celular, solo se requiere de la descarga de la aplicación hacia el dispositivo que requiera utilizarse.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



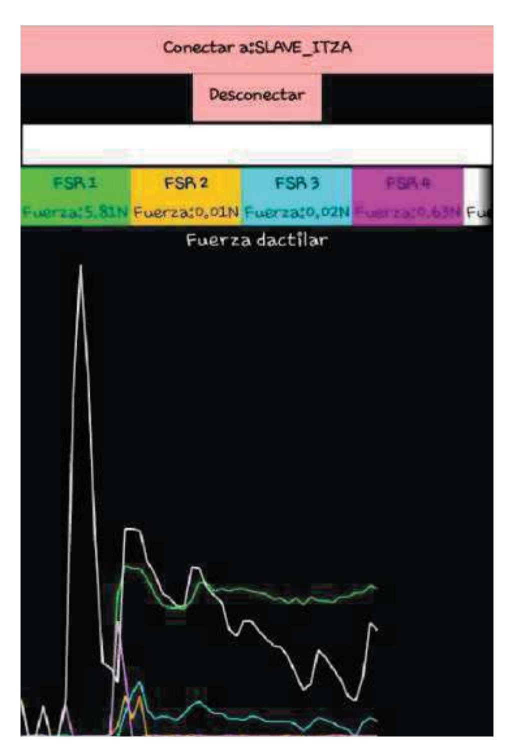


Figura 7. Aplicación Android en ejecución.

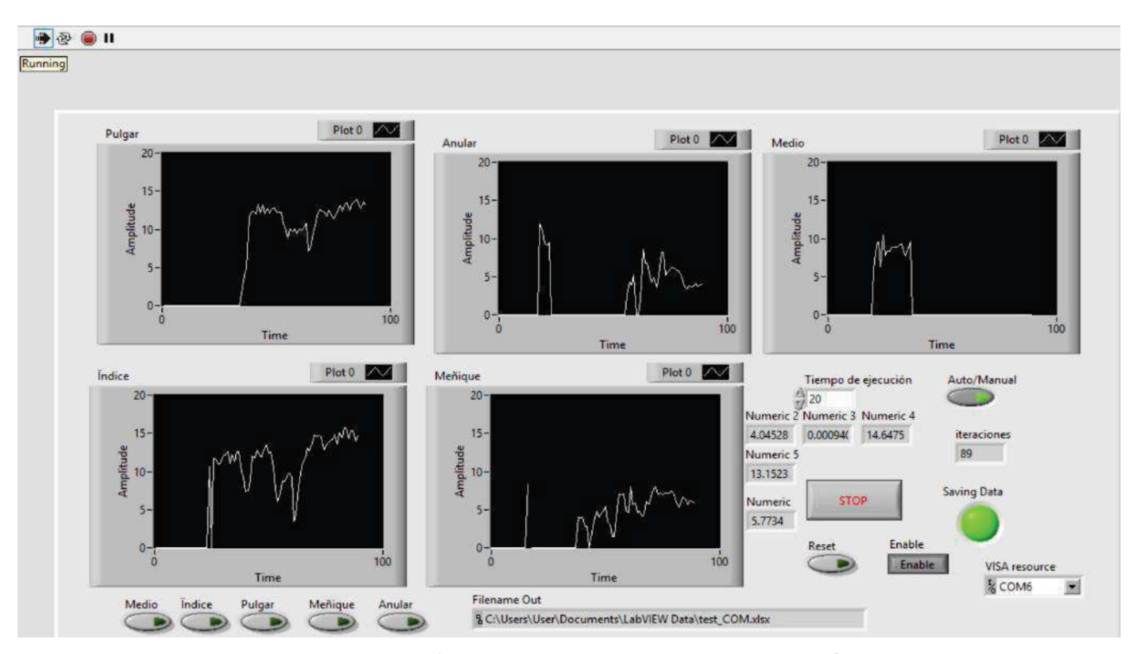


Figura 8. Interfaz de usuario LabVIEW en ejecución.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la figura 9 se observa el sistema montado en una mano haciendo un tipo de pinza por oposición terminal que es cuando el pulgar se presiona con algún otro dedo opuesto en este caso con el índice y en la figura 10 se puede observar una pinza trípode que es el contacto del pulgar con dos dedos opuestos. Este dispositivo solamente es capaz de medir la fuerza aplicada en pinzas que involucren la yema de los dedos, por ejemplo: pinza por oposición terminal, pinza de prensión, agarre palmar, pinza trípode, entre otras.

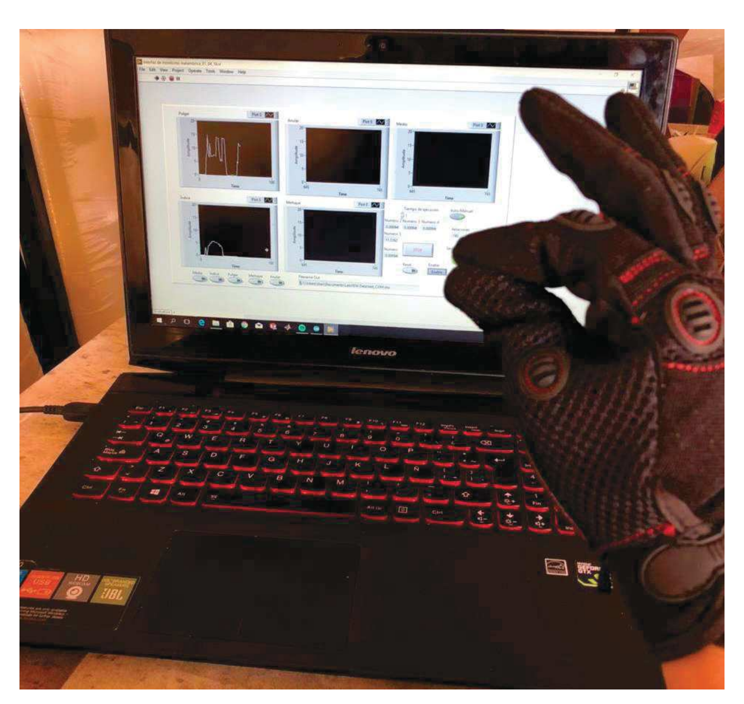


Figura 9. Pinza por oposición terminal envío inalámbrico de fuerza a LabVIEW.

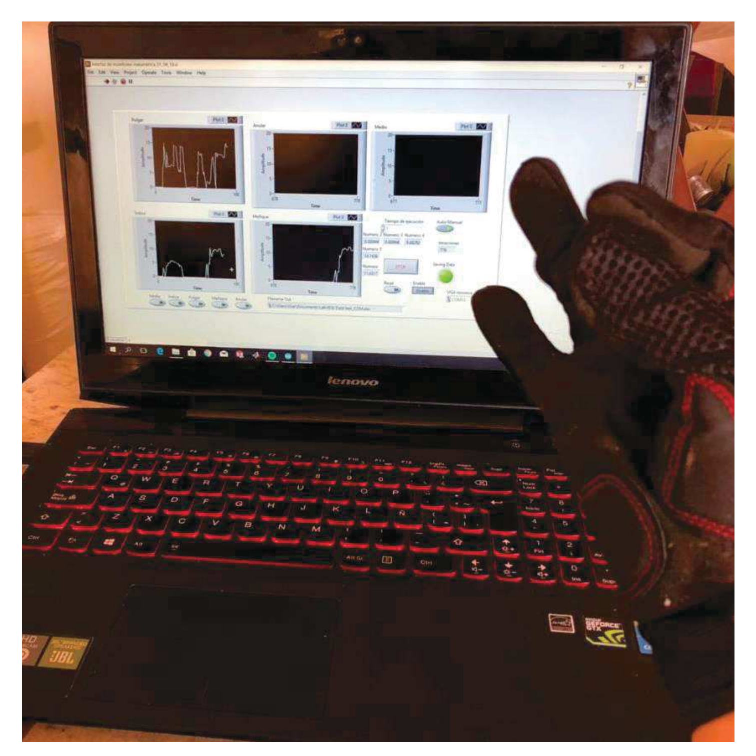


Figura 10.- Pinza trípode envío inalámbrico de fuerza a LabVIEW.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Como se puede observar en las figuras anteriores, se tiene una respuesta en tiempo real de LabVIEW cuando los sensores se presionan. El tiempo de ejecución para la prueba se hizo con 5 milisegundos con una velocidad de transmisión de 9600 baudios. Si bien las fotografías muestran solamente dos tipos de agarres pueden medirse diferentes tipos de ellos mientras involucren la fuerza de contacto con las falanges distales de los dedos de la mano humana.

3.1 Aplicación del dispositivo desarrollado

Como ya sabemos, la mano representa una de las partes más importantes del cuerpo ya que nos ayuda a realizar desde tareas de gran precisión como cirugías hasta cosas tan comunes como escribir, pintar o comunicarnos. Por esto, es importante conocer cómo se comportan los dedos al momento de realizar algunas de estas actividades mediante dispositivos como el ya desarrollado que es capaz de medir la fuerza aplicada por la mano.

Una de las aplicaciones de este dispositivo es para rehabilitación, el terapeuta se ve beneficiado al contar con un dispositivo que le ayude a dar continuidad con la rehabilitación de algún paciente que sufra de algún tipo de traumatismo, que tenga alguna atrofia muscular o pérdida de fuerza en su extremidad superior. Otras aplicaciones importantes son en el campo de la robótica para manos robóticas o efectores finales, el principio es el mismo, aunque pueda cambiar el diseño del protector donde se alojen los sensores, sus aplicaciones son diversas.
.

3.2 Discusión de resultados

El dispositivo se considera útil ya que es capaz de medir en un rango de 1Kg a 7Kg, donde 7Kg es la fuerza máxima aplicada por el pulgar sobre una superficie plana y rígida. Por lo tanto, es capaz de medir la fuerza de todos los dígitos de la mano lo que nos conduce a decir que su aplicación en rehabilitación ortopédica o prótesis es adecuada. En cuanto a la fiabilidad del dispositivo, la desviación estándar calculada a partir de las mediciones tomadas es de ±0.23 Newtons aproximadamente. Calculando el coeficiente de Pearson, herramienta estadística que nos ayuda a conocer la correlación entre dos variables como lo son este caso voltaje y fuerza, tenemos como resultado un coeficiente de correlación de 0.95 lo que indica correlación positiva alta entre variables. El error puede derivarse tanto del instrumento que se utilizó como del encargado de tomar las medidas. Con lo anterior, se puede decir que el dispositivo es confiable en el rango dado.

4. Conclusiones

Se reporta la construcción de un medidor de fuerza de agarre para la mano humana. El dispositivo es capaz de medir 70 Newtons como fuerza máxima por digito, tiene comunicación inalámbrica Bluetooth y se usa como un guante para mano diestra.

Este dispositivo es capaz de realizar mediciones tanto para agarres de fuerza como de precisión, sin embargo, no puede medirse fuerza de contacto de la palma ya que no se cuenta con sensor de fuerza en esta ubicación. Las aplicaciones aptas para este dispositivo son medir la fuerza de agarre de mano humana o fuerza de agarre de una prótesis o de algún manipulador con dígitos, ya que en su mayoría estos últimos dos dispositivos mencionados no cuentan con un sistema de sensado que permita conocer la fuerza de agarre que se ejerce sobre objetos, lo cual es importante para no causar en ellos daños permanentes. También puede ser aplicado como herramienta para rehabilitación ortopédica en casos como traumatismos o pérdida de fuerza de la mano debido a

ISBN: 978-607-9394-14-1.



actividades repetitivas. Las aplicaciones inalámbricas desarrolladas permiten que por ejemplo en el caso de rehabilitación, el paciente y el terapista puedan visualizar gráficamente los resultados de la terapia dada.

Dentro de las contribuciones que se tienen son la adaptación de sensores de fuerza a un guante sintético para mayor comodidad del usuario, portabilidad del dispositivo, el método de caracterización de los sensores que fue utilizando un texturómetro y el envío de datos de forma inalámbrica hacia una aplicación Android y a una computadora.

Referencias

[1] J. Napier, «The prehensile movements of the human hand,» *The journal of bone and joint surgery,* vol. 38B, nº 4, p. 902, 1956.

[2] C. A. Guzmán Luna, D. L. Moreno Gómez , J. D. J. Monroy Bautista, J. I. López Lozano, N. J. Ángeles Alameda y J. G. Vázquez López, «Guante sensorial para la medición de la fuerza dactilar en las falanges de la mano,» de *Congreso Nacional de Tecnología Aplicada a Ciencias de la Salud*, Puebla, 2016.

[3] I. Ortegón, N. Alba Baena, E. Martínez, R. Ñeco Caberta, A. Quezada Carreón y M. C. Salazar Álvarez, «Prototipo Inalámbrico para la Medición de la Fuerza de la Mano Humana,» *CULCyT,* nº 57, pp. 108-115, 2015.

[4] A. Peréz González, M. Jurado Tovar y J. L. Sancho Bru, «Fuerzas de contacto entre mano y objeto en el agarre cilíndrico: comparación de dos técnicas de medición.,» de *XIX Congreso Nacional de Ingenieria Mecánica*, Castellòn, España, 2012.

[5] A. Kargov, C. Pylatiuk, J. Martin, S. Schulz y L. Doderlein, «A comparison of the grip force distribution in natural hands and in prosthetic hands,» *Disability and Rehabilitation,* vol. 26, nº 12, pp. 705-711, 2004.

[6] Intlink Electronics, «Interlink Electronics,» [En línea]. Available: www.interlinkelectronics.com. [Último acceso: 16 Febrero 2018].

[7] Gadgetas, «MIT App Inventor,» 2012-2017. [En línea]. Available: http://ai2.appinventor.mit.edu/?locale=en&galleryId=4537088305004544. [Último acceso: 25 Marzo 2018].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 223-234.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Desarrollo de la Instrumentación Electrónica para el Control de los Mandos de Vuelo Primario en un Simulador de Avión con Plataforma de Movimiento

Hernández Islas Jorge, Dávalos Martínez Manuel Andrés, Estrada Trejo Astrid Carolina y Gabriel Sepúlveda Cervantes

[1] Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo
[2] Tecnológico de estudios superiores de Ecatepec

Resumen

Ante la oportunidad de complementar un sistema de simulador de vuelo para así obtener un mejor resultado en el desempeño del uso del sistema, se desarrollaron los controles de mando de vuelo de una aeronave Cessna 172.

Como parte de la formación de los pilotos se les debe entrenar en situaciones donde se presente pérdida de control de las naves, desorientación espacial, casos de complejidad climática como tormentas eléctricas, incomunicación o cualquier otro problema inesperado esto con la finalidad de que aprendan a lidiarlos así como a prevenirlos.

Sin embargo, existen varios inconvenientes durante la capacitación, desde la disponibilidad de aviones de práctica hasta perdidas en equipo muy costoso por mal manejo del equipo, entre otros.

Con el fin de instruir de manera adecuada en la formación de los pilotos sin tener pérdida de equipo costoso, surge la necesidad de mejores herramientas para el aprendizaje del manejo de una aeronave como los simuladores de vuelo. Estos pretenden replicar la experiencia de pilotar un avión, entre más precisa y realista mejores resultados se presentan al momento de ocupar un equipo real.

Con el objetivo de recrear el pilotaje de una aeronave de manera fidedigna se desarrollaron los controles de mando de vuelo para un simulador de avión con plataforma de movimiento, desarrollado en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo (CIDETEC).

El simulador de vuelo lleva a una experiencia inmersiva ya que ocupa un casco de realidad virtual además de que tiene integrada la plataforma móvil que es un manipulador paralelo de dos grados de libertad que genera una retroalimentación háptica al usuario para simular el movimiento del avión.

Palabras clave: Simulador de vuelo, manipulador de 2 grados, realidad virtual.

Abstract

Given the opportunity of a complementary flight simulator system to obtain a better result in the performance of the system, it has been prepared for the controls of a Cessna 172 aircraft. The flight simulator has an immersion experience that a headmounted display that also has the mobile platform developed in the Center for Technological Innovation and Development in Computing (CIDETEC) that is a parallel manipulator of two freedom degrees that generates an haptic feedback to the user to simulate the movement of the plane.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 223-234.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



1. Introducción

Los simuladores de vuelo son herramientas que permiten a un usuario tener la experiencia de manipular el vuelo de un avión, dependiendo el desarrollo de cada uno de los simuladores se puede clasificar su uso como de videojuego, investigación, uso militar en defensa y seguridad, entrenamiento para vuelo comercial, etc. También la tecnología usada en cada sistema puede llevarlo a otra clasificación puede ser un simulador simple donde ocupe teclado y mouse hasta una cabina con una plataforma con 6 ángulos de movimiento, siendo estas más sofisticadas y exclusivas para uso gubernamental.

La sensación de vuelo en cada sistema también varía, los sistemas simples donde permiten pilotar usando un teclado y mouse no retribuyen en el aprendizaje para manipular un avión siendo estos sistemas emuladores de vuelo, ya que permiten el control del avión pero sin llevar acabo el mismo funcionamiento que el de un avión real.

Existen muchos simuladores como ***Microsoft Flight Simulator*** desarrollada en 1977 por Bruce Artwick, cuenta ya con más de 13 versiones, es un videojuego que proporciona 3 opciones para dirigir el avión ya sea por teclado, un joystick de control de mando, el cual es más realista, o con un mouse Yoke que es similar al joystick. [1] Pero no cuentan con una plataforma móvil el cual pueda completar la sensación de vuelo.

Utilizando el software X-plane que proporciona lo antes mencionado pero de manera virtual, gracias al casco virtual Oculus Rift el cual lleva al usuario a tener una sensación de estar dentro del escenario de vuelo. Pero para tener el sentido de interacción con el escenario y que este se modifique con las acciones del usuario para completar una experiencia inmersiva, se decidió implementar una plataforma móvil desarrollada en el CIDETEC el cual necesita una forma de comunicación con el software del simulador para que trabajen de forma simultanea de esta manera se crearon los controles de mando de vuelo que manipularan a la plataforma y al escenario virtual.

2. Sistema

El sistema obtiene los movimientos del usuario cuando este manipula los controles de mando entonces se actualizan los datos del ambiente virtual reflejándose en la simulación que el usuario percibe de manera visual por medio del casco virtual y por el movimiento que genera la plataforma llevando así al usuario a una experiencia inmersiva.

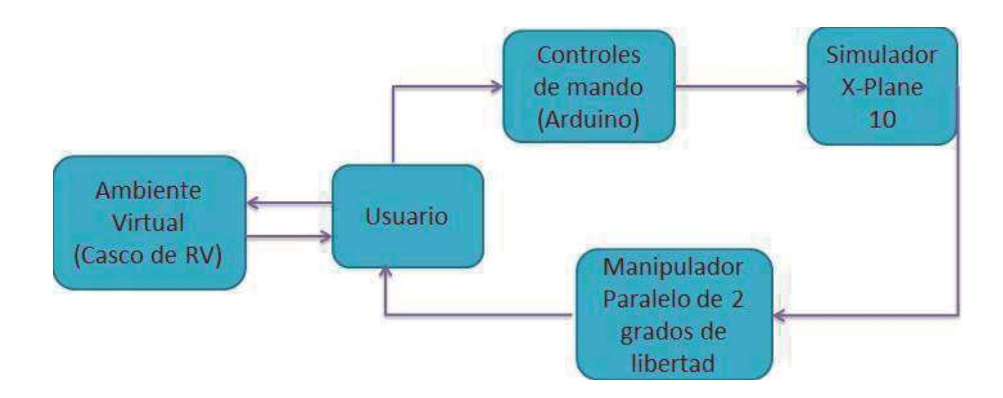


Diagrama funcional

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1 Software

X-Plane es en un potente simulador para ordenadores personales, no es un juego, sino una herramienta de ingeniería que puede ser utilizado para predecir las cualidades de las aeronaves y helicópteros con una precisión increíble [2].

Cuenta con una amplia gama de modelos en 3D de aviones y escenarios para navegar así como puertos de aterrizaje por eso mismo solo se enfocó al diseño de los controles para el modelo de avión Cessna 172.

Otros de los softwares que se usaron fue de UnoJoy, de donde se obtuvieron los drivers y la biblioteca para poder hacer que la computadora detecte al arduino como joystick [3].

2.2 Hardware

El hardware que conforma al sistema es el siguiente:

2.2.1 Plataforma

La plataforma de movimiento cuenta con 2 grados de libertad que son el pitch, que es el cabeceo o inclinación hacia adelante o hacia atrás, y el roll o alabeo, que es la inclinación hacia la derecha o izquierda. Soporta un peso de 200 kilogramos, emplea dos motores de 24 volts de corriente directa y hasta 10 Amperes por cada motor. El ángulo de cabeceo de la plataforma es de $\pm$6° y el del alabeo es de $\pm$8° aproximadamente.

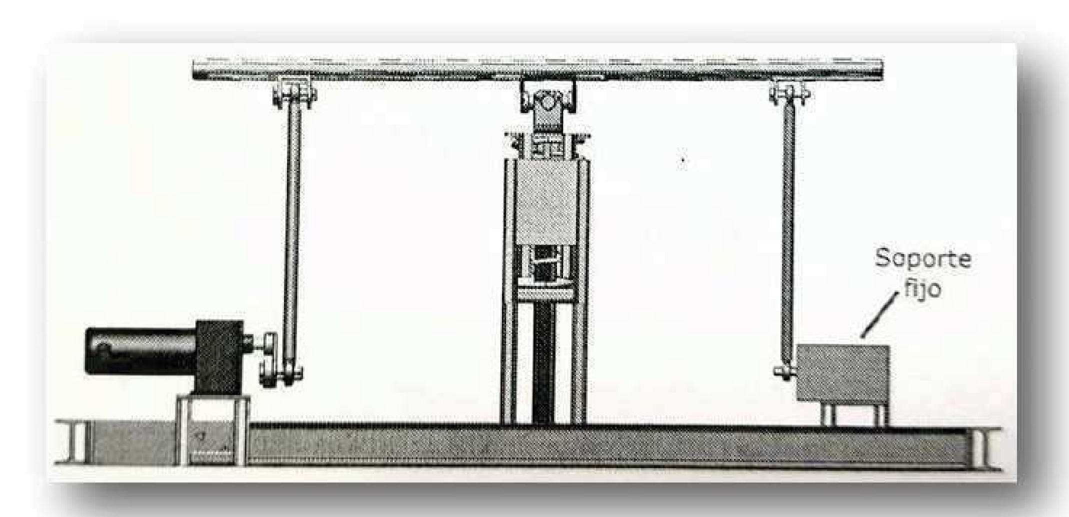


Figura 1. Manipulador paralelo de 2 grados de libertad [4].

Los movimientos de la plataforma son dados por el simulador de vuelo, ya que éste envía los ángulos deseados de alabeo y cabeceo a la tarjeta de Arduino a través de la comunicación serial (USB) para que esta mueva la plataforma a la posición deseada.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2.2 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están interconectadas dentro del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se le conoce como microcomputadora. Se puede decir con toda propiedad que un microcontrolador es una microcomputadora completa encapsulada en un circuito integrado. [5]

El microcontrolador utilizado para los controles del simulador es el Arduino Uno.

Arduino es una plataforma prototipo (de código abierto) basada en un hardware y software fácil de usar. Se compone de una placa de circuito, que puede ser programado y un software ya hecho llamado Arduino IDE (Integrated Development Environment), que se utiliza para escribir y cargar el código de computadora a la tarjeta física. [6]

En la Fig. [2] se indican los distintos que fueron utilizados:

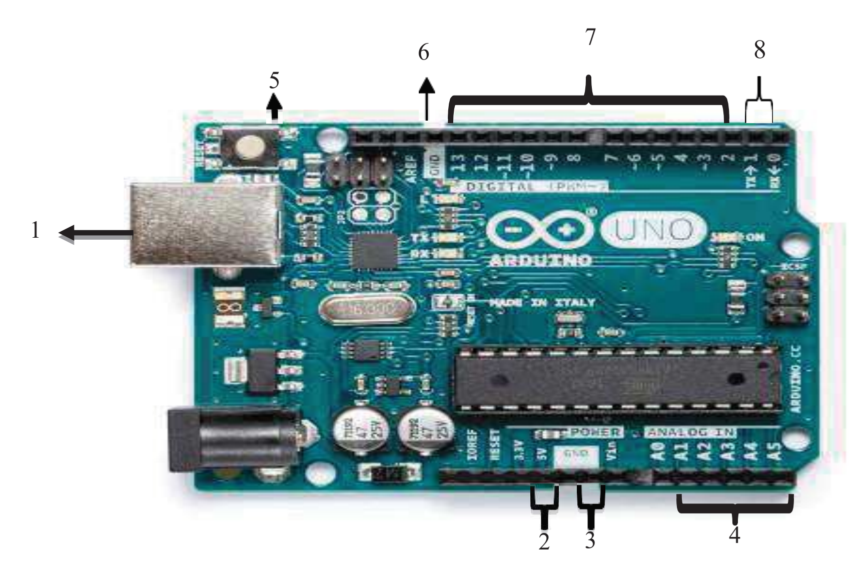


Figura 2. Arduino Uno.

1. Sirve para alimentar nuestra placa Arduino por medio de un cable USB.
2. Estos pines se usan para poder tener 3 y 5 Volts de salida respectivamente.
3. Este pin sirve para conectar a tierra el circuito.
4. Estos pines sirven como entrada analógica (A0 a A5), por medio de una programación pueden ser cambiados a una entrada digital.
5. Este botón sirve para resetear la placa Arduino.
6. Este pin sirve para conectar a tierra el circuito.
7. Estos pines pueden ser configurados para trabajar como pines digitales de entrada o salida para leer los valores lógicos (0 ó 1).
8. Sirve para la transmisión en serie siendo un pin para transmitir y el otro como receptora.

Siendo para el desarrollo del sistema como se muestra en la fig.[3] la conexión de los componentes que son utilizados para el control de los mandos dentro del simulador de vuelo, del lado izquierdo marcado de rojo se puede observar la conexión de 4 conectores los cuales están destinados para cada uno de los potenciómetros, en donde el potenciómetro 1 es el encargado de leer el movimiento de pitch (cabeceo) por medio del joystick, el potenciómetro 2 es el encargado de leer el movimiento de roll (alabeo) por medio del joystick, el potenciómetro 3 es el encargado de leer el movimiento de throttle (acelerador) por medio de la palanca y el potenciómetro 3 es el encargado de leer el movimiento de Yaw (guiñada) por medio de los pedales.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 223-234.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



A la derecha de la fig.[3] marcada de color amarillo se puede observar la conexión de 3 conectores destinados a 3 botones, en donde el botón 1 activa o desactiva el freo de la aeronave, los botones 2 y 3 controlan el movimientos de los flaps donde el botón 2 sube el flaps 5 grados y el botón 3 baja el flaps 5 grados.

Al centro de la fig.[3] marcado de color verde se puede observar la placa Arduino Uno, la cual se encarga de la comunicación y alimentación de los potenciómetros y los botones con la computadora. Los potenciómetros serán destinados a las entradas analógicas de la placa Arduino Uno del pin A0 al pin A3, los botones se conectaran del pin D5 al pin D7, así como la corriente al pin de 5v y la tierra al pin GND.

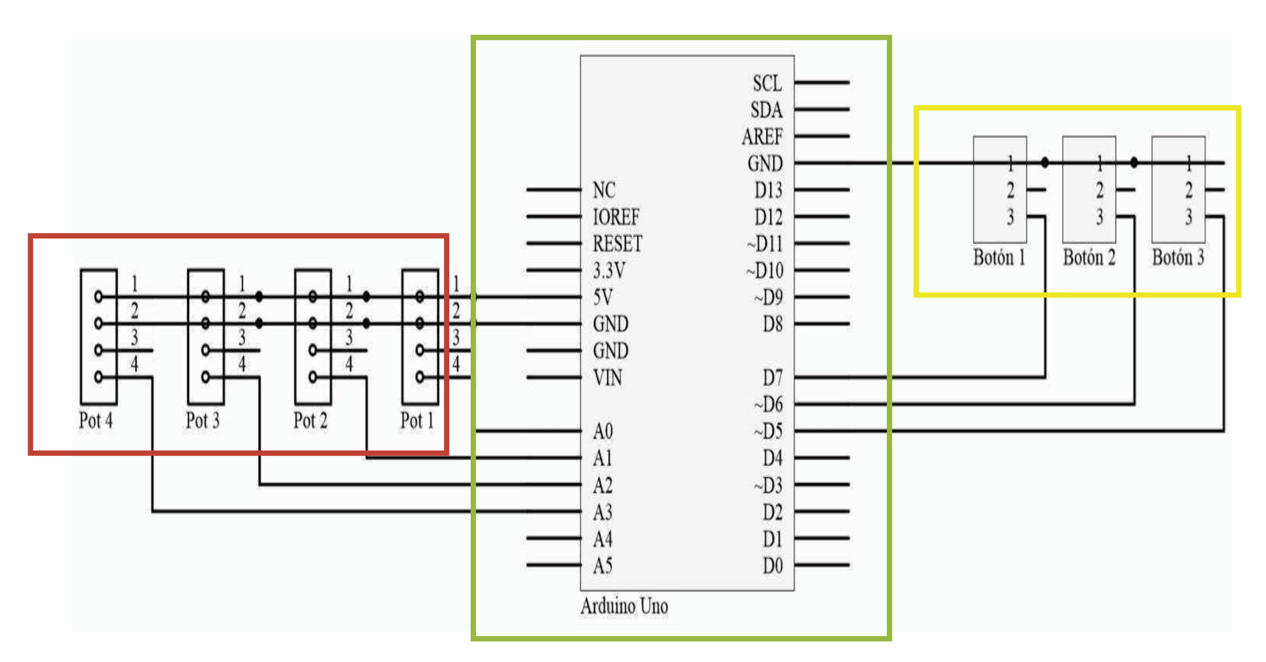


Figura 3. Circuito de conexión.

2.2.3 Instrumentos del avión

Los instrumentos que se usarán para el simulador nos permitirán tener control sobre la aeronave, permitiendo mover el pitch, roll y yaw de esta misma. En la fig.(4) se puede apreciar los comportamientos de cada uno de estos movimientos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



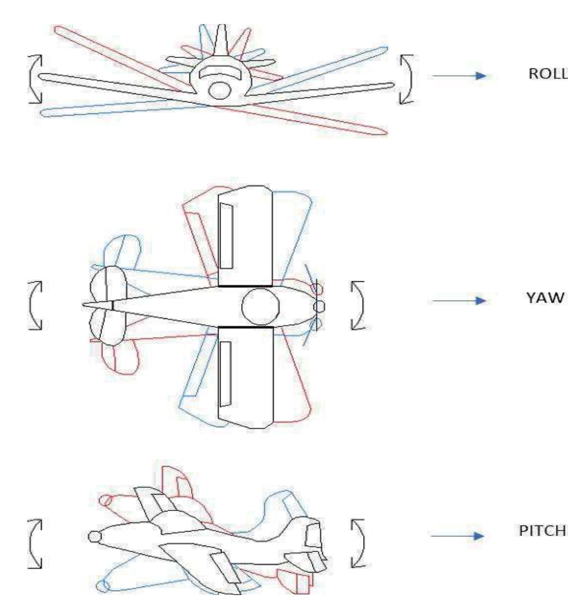


Figura 4. Movimientos de la aeronave

2.2.3.1 Joystick

Es el encargado de proporcionarnos control sobre el pitch y roll de la aeronave al momento de elevar/descender y virar el avión. El alabeo será proporcionado con el movimiento del joystick al moverlos hacia los costados, mientras que el movimiento de adelanta/atrás proporcionara el pitch y estos movimientos se reflejaran en el indicador de horizonte artificial el cual nos proporcionar una referencia inmediata de la posición del avión en alabeo y profundidad; es decir, si está inclinado lateralmente, con el morro arriba o abajo, o ambas cosas, con respecto al horizonte. En la fig(5) se muestra el indicador de horizonte artificial.



Figura 5. Indicador de Horizonte Artificial

La altitud del avión será proporcionada por el movimiento pitch (cabeceo) y será indicado en el altímetro que nos muestra la altura a la cual está volando el avión. El hecho de que sea el único aparato que indica la altitud del aeroplano hace del altímetro unos de los instrumentos más importantes. En la fig. (6) se muestra el altímetro.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 223-234.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 6. Altímetro

2.2.3.2 Palanca

Es la encargada de proporcionar la potencia a la aeronave, la potencia será proporcionada por el movimiento de throttle (acelerador) y será medida en revoluciones por minuto (rpm), los indicadores asignados para las lecturas de este movimiento de la palanca son el indicador de velocidad aerodinámica o anemómetro fig.(7), este instrumento mide la velocidad relativa del avión con respecto al aire en que se mueve y la lectura se toma es en nudos, y el tacómetro que nos indica las revoluciones por minuto a las que está trabajando el motor según el movimiento de throttle fig.(8).



Figura 7. Indicador de velocidad aerodinámica



Figura (8). Tacómetro

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2.3.3 Botones

Los botones se encargaran de tres funciones importantes para el despegue o aterrizaje del avión, en el caso del botón 1 que está encargado de la activación o desactivación de los frenos, se mostrará la leyenda “BRAKES” en el display fig.(9) que se encuentra en la parte superior de nuestro panel de instrumentos cuando los frenos frenos estén activos.



Figura 9. Display con leyenda “BRAKES”

En la parte inferior del panel de instrumentos se encuentra una palanca con la cual se controlara el movimiento de los flaps, el botón 2 moverá la palanca hacia arriba indicando que los flaps deben bajar 5 grados y el botón 3 moverá la palanca hacia abajo indicando que los flaps deben subir 5 grados. El movimiento de los flaps es indispensable en distintos puntos de vuelo de una aeronave, un ejemplo de esto es al momento de despegar, pues ayudan a la aeronave a generar mayor sustentación en las alas por cual necesitará menos pista para despegar, o al aterrizar provocando que la aeronave disminuya la velocidad. Ver fig.(10).



Figura 10. Palanca de flaps

2.2.3.4 Pedales

Los pedales se encargan de proporcionar mayor control en la aeronave al momento de virar el avión además de facilitar el cambio de rumbo en caso de ser necesario. Cuando la aeronave está virando es necesario tener un viraje coordinado por lo tanto el piloto hace uso de los pedales para no entrar en una situación en la que la aeronave se deslice o se derrape, esta indicación la podemos apreciar en el coordinador de virajes fig.(11), cuando la esfera negra se mantiene en el centro está indicando que el viraje es coordinado.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura11. Coordinador de virajes

2.2.4 Comunicación entre Controles de mando y Plataforma

La comunicación entre los mandos de vuelo y la plataforma funciona teniendo como base el simulador de vuelo Xplane 10, ya que el simulador recibe las señales de movimiento de cada uno de los mandos de vuelo, e igualmente manda un conjunto de datos a la plataforma para que esta responda de manera adecuada.

La comunicación comienza cuando el joystick se mueve en pitch (cabeceo) y roll (alabeo) mandando una señal al microcontrolador Arduino Uno, el cual está programado para que las señales que manda el joystick se transformen en datos que puedan ser leídos por cualquier equipo de cómputo. El simulador Xplane 10 reconoce estos datos y mueve la aeronave en la dirección en que se configuro el joystick.

Posteriormente el simulador Xplane 10 manda los datos del movimiento de la aeronave a la plataforma móvil. Para que esto sea posible es necesario es necesario tener actualizado Xplane en la versión 10.51, esta actualización nos dará acceso al panel de configuración donde podremos indicar el puerto de datos, la velocidad de trasmisión, los datos que deseamos mandar y en caso de ser necesario la opción de conectar algún otro dispositivo para la visualización de los instrumentos.

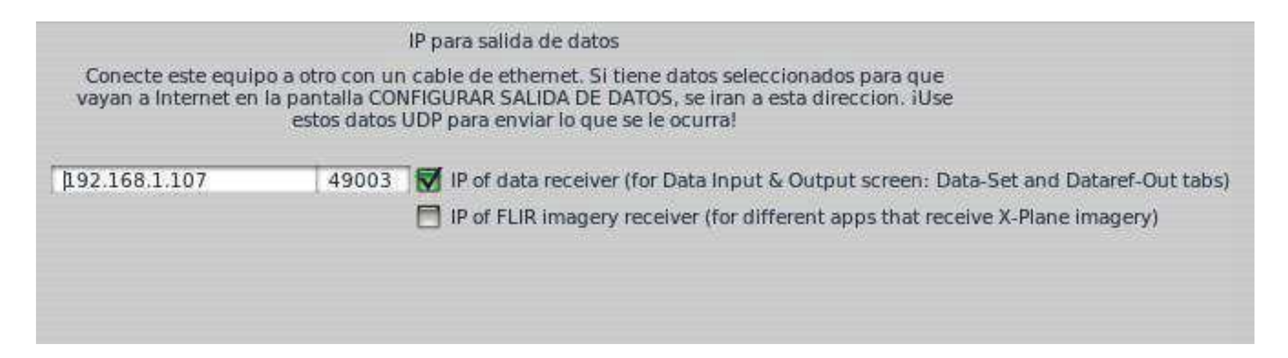


Fig.12 Panel de configuración Xplane 10.51

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 19, pp. 223-234.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



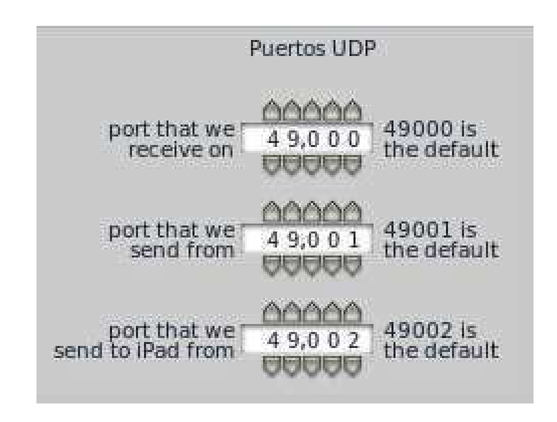


Fig.13 Panel de configuración Xplane 10.51

Con la configuración del simulador correctamente realizada se obtienen datos que son procesados por un dll encargado de transmitir estos datos en el formato correcto para que los componentes de la plataforma móvil puedan leerlos sin ningún problema. El dll es programado para que su conexión sea enlazada con el COM que corresponde al Arduino de la plataforma móvil. La comunicación comienza al crear un puerto COM, es indispensable establecer de manera correcta en que puerto funciona el Arduino de la plataforma, la velocidad de trasferencia e indicar que el puerto está abierto para la comunicación.

Tabla 1. Puerto COM.

Asignación	Programación	Descripción
SerialPort	SerialPortPuertoSerie = new SerialPort();	Crea puerto COM
PortName	PuertoSerie.PortName = "COM5";	Asignación de puerto COM
BaudRate	PuertoSerie.BaudRate = 9600;	Velocidad de transmisión de datos
Open	PuertoSerie.Open();	Indicación de puerto abierto

Una vez establecido el puerto COM el dll comienza con la lectura de datos que son proporcionados por el simulador de vuelo Xplane 10, fue necesario establecer un hilo en el cual podamos ingresar una cadena la cual nos arroje los datos en “flotante”, además ingresar la comunicación del dll, pero con el simulador, la asignación del puerto para la comunicación con el simulador es configurada dentro del panel de configuración del mismo Xplane.

Tabla 2. Lectura de datos.

Asignación	Programación	Descripción
Thread	Thread Hilo = new Thread(hilo);	Crea nuevo hilo
Float	float theta, psi, phi;	Datos que serán flotantes
String	string mesg, theta_s, psi_s, phi_s;	Datos de la cadena
Int	int puerto = 49003	Puerto de comunicación con el simulador

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los datos obtenidos son enviados al puerto del Arduino de la plataforma para que sean interpretados y gracias a la configuración y programación de la de la plataforma esta se pueda mover en la misma dirección que la aeronave dentro del simulador Xplane 10.



Fig.14 Comunicación Mandos, Xplane, Plataforma.

Conclusiones

Los objetivos que se establecieron desde el principio se pudieron alcanzar permitiendo al usuario poder pilotear le Cessna 172 del simulador X-Plane 10 con los instrumentos que se propusieron, así como como poder visualizar el simulador con los óculos y sincronizar el simulador con la plataforma del CIDETEC, permitiendo al usuario experimentar los movimientos de pitch y roll. Gracias al simulador X-Plane 10 se pueden recrear distintos eventos de riesgo donde los usuarios pueden practicar sus habilidades para tener una operación segura, sin comprometer una aeronave real. En un futuro a este proyecto se le podría integrar más instrumentos del panel de cabina para que de este modo los usuarios tengan una experiencia más real.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Referencias

[1] Microsoft Flight Simulator .Consulta online abril 2018. Disponible en https://www.microsoft.com/Products/Games/FSInsider/news/Pages/AMessageFromAces.aspx

[2] Aerosotf Gmbh, "X Plane 10 Manual", Alemania, 2012

[3] UnoJoy. País.Consulta online abril 2018. Disponible en https://github.com/AlanChatham/UnoJoy

[4] Guerrero, Omar (2017). Desarrollo de un simulador háptico de vuelo de helicóptero (Tesis de posgrado). Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, México.

[5] Despradel Novas Peña, "Microcontroladores Arquitectura, programación y aplicación", Atlantic International University, pag. 5, 2008

[6] Arduino. Consulta online abril 2018. Disponible en https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 235-248.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Desarrollo de un Sistema de Control Embebido para un Brazo Robótico 3GDL

Alejandre-Flores Marisol[1], Hernández-Oliva Noemi[1], Villegas-Medina Gerardo[2], García-Cortés Rocío [3] y Hernández-Cerón Noé R[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional CECyT 2 Miguel Bernard; [2]Instituto Politécnico Nacional SEPI ESIME Azcapotzalco; [3]Instituto Politécnico Nacional Secretaria de Investigación y Posgrado

Resumen

En el presente artículo se plantea el diseño y construcción de sistema de control sencillo para un robot de 3 grados de libertad (GDL) que en un futuro se espera que sirva de apoyo para la toma de ultrasonidos de vesícula biliar, para ello se propuso un control básico dentro de una placa Intel Galileo Generación I embebida en el prototipo, el cual se encarga de recibir y leer las instrucciones provenientes del joystick, que a su vez sirve para tele operar el brazo. Como resultado se obtuvo un primer diseño del prototipo y su correspondiente validación de los diferentes sistemas que lo integran, además fue posible plantear una solución viable en este tipo de aplicaciones y cumplir con el objetivo planteado en su primera etapa de desarrollo.

Palabras clave: Sistema embebido, control, brazo robótico, Intel Galileo I, motor DC, servomotor, lenguaje C, microSD

1. Introducción

Actualmente el desarrollo y aplicaciones de sistemas embebidos en México como en otros países, se encuentra ampliamente relacionada con diferentes industrias como lo son la electrónica, informática, electrodomésticos, automotriz y aeronáutica entre otras [1]. Hace casi cuarenta años que se hizo la primera implementación de un sistema embebido dentro de un automóvil y este se utilizó para controlar el encendido. Hoy en día este tipo de tecnología se encuentran disponible en todo momento de nuestra vida cotidiana, por ejemplo, un horno de microondas, un ascensor, un equipo de audio, un avión, son controlados por computadoras que normalmente no poseen una pantalla, un teclado o disco rígido y no responden a lo que conocemos como PC, sin embargo, es posible programarlas. Actualmente existen una gran variedad de estos y sus aplicaciones son muy diversas como ya se ha mencionado, ya que pueden ser de gran utilidad al momento de realizar el procesamiento de órdenes y datos en un mismo dispositivo. Por lo que se pueden considerar como sistemas de cómputo en tiempo real, los cuales están diseñados para aplicaciones específicas, puesto que, dependiendo del modelo y el tipo, estos tienen diferente capacidad de procesamiento y recursos en hardware. Además, estos sistemas poseen una interfaz externa que permite efectuar un monitoreo del estado de las variables manipuladas y hacer diagnósticos de este, el cual está orientado a reducir los costos y mejorar la confiabilidad de los procesos. Una definición de sistema embebido que se considerara hace referencia a todo circuito electrónico digital capaz de realizar operaciones de computación, generalmente en tiempo real, que sirven para cumplir una tarea específica en un producto [2].

En el caso de sistemas mecatrónicos, han sido empleados desde los años 80's, ya que se pueden programar algoritmos en el mismo sistema, por ser una sola tarjeta, además pueden estar colocados sobre el mismo prototipo. Con estas nuevas tecnologías como tarjetas de adquisición y procesamiento de datos se han logrado desarrollar robots inteligentes, los cuales son capaces de procesar datos complejos y permitir la comunicación entre dispositivos, sin embargo, para el caso de los robots quirúrgicos, también ha sido en los años 80's que comenzaron a utilizarse en tareas específicas que usualmente son operadas por los cirujanos sirviendo de apoyo en las tareas más

ISBN: 978-607-9394-14-1.



complejas o muy cansadas. En ese sentido y a continuación, se detallarán algunos trabajos de interés que han sido reportados en la literatura sobre robots desarrollados para aplicaciones médicas y que sirvieron de referencias para el presente artículo. En [3] 1989 Y Wang funda la empresa Computer Motion Inc. la cual estaría especializada en robots quirúrgicos y se encargaría de desarrollar robots como AESOP y Zeus. Este último comenzó a desarrollarse en el año de 1993 y se presenta en el año de 1995 su primer prototipo. La administración de medicamentos y Alimentos (Food and Drug Administration, FDA) ha concedido a Zeus únicamente una aprobación limitada para operaciones abdominales. Este puede ser usado como camarógrafo y asistente operativo, pero todavía no como cirujano operador. Por otro lado, en [2], en el año de 1996 AESOP del modelo 4000 obtiene la aprobación de la FDA, y sirve como sustituto de un camarógrafo laparoscópico y puede ser manipulado manualmente, a distancia o mediante comandos de voz dados por los cirujanos y se convierte en el primer robot en ayudar en una cirugía. Por otro lado [3], se presenta un robot que desde el año 1999 fue creado, a este le llamaron el robot "Da Vinci", y para el año 2000 fue aprobado por la FDA, en el año 2005 realizo más de 200000 cirugías, este robot es el más avanzado en el sector quirúrgico ya que facilita la cirugía compleja con un enfoque mínimamente invasivo hasta el momento.

La capacidad de controlar dispositivos robóticos en un entorno remoto (teleoperacion) [4] por medio de comandos que permitan percibir, explorar e interactuar con entornos alejados del usuario donde la telepresencia podría verse como una extensión de las funciones sensoriales. A pesar del desarrollo de estos robots quirúrgicos para la teleoperación quirúrgica, aun no se ha desarrollado un robot para el campo de los ultrasonidos de ningún tipo que ayude a realizar o haga directamente el proceso de la toma de estos. Sin embargo, los sistemas robóticos son una alternativa atractiva capaz de realizar tareas espaciales de registro y manipulación de forma rápida, precisa y repetible. También se hace referencia en [5] que la robótica industrial ayuda a la manipulación automática, mediante sistemas servo-controlados, reprogramables, capaces de posicionar y orientar piezas, materiales o dispositivos especiales, en la mayoría de los casos siguiendo trayectorias variables y reprogramables.

Lo que conlleva a que el brazo robótico facilite la tarea de realización de esfuerzos por parte de un trabajador o personal. Los brazos robóticos tienen campo de aplicación en diferentes áreas y para su control se utilizan diferentes técnicas que permiten tareas de operación superficial. En [6] como se menciona se hace uso de la colocación de una aguja robótica guiada en ultrasonido tridimensional pero solamente de manera experimental, obteniendo como resultados el sesgo de error y reducir la invasividad (la cantidad de inserciones), haciendo una comparación de la inserción manual de la aguja con este método. Los sistemas que utilizan técnicas no invasivas y destructivas [7] tienen una gran aceptación debido a sus ventajas ya que no modifican el medio sobre el cual se está realizando la medida. Los sistemas de medida que utilizan ondas acústicas son no invasivos y en la mayoría de los casos no destructivos, dentro de estos, son los sistemas que utilizan señales ultrasónicas y son usados en las aplicaciones médicas, estéticas, industriales y militares, es por ello por lo que este tipo de sistema requiere de alta confiabilidad y precisión. Como se menciona [8], la robótica en cirugía se presenta como una asistencia, no como un sistema autónomo. De ahí se desprende el concepto de RCAS (Computed Aid Surgery o Cirugía Robótica Asistida por computadora). Un sistema R-CAS se alimenta con los datos médicos del paciente y consiste en tres módulos diferenciados: sistema planificador quirúrgico, sistema de simulación y/o entrenamiento y robot de asistencia médica.

Actualmente, y a pesar de las múltiples aplicaciones en las que se emplean sistemas embebidos, se pudo apreciar que es posible aportar y generar conocimiento por medio del prototipo descrito, puesto que hasta ahora son pocos los asistentes robóticos diseñados para realizar alguna tarea especifica en el área de la medicina, o están muy enfocados en operaciones quirúrgicas o de prótesis, ortesis, entre otras.

En el caso de la toma de ultrasonidos de vesícula biliar, el procedimiento que se debe seguir es extenuante para el radiólogo, por lo que este desarrollo de asistencia pretende contribuir en generar una posible solución que facilite el trabajo del operador humano, por lo que se propuso de forma muy simple un mecanismo con el cual se pueda verificar que la presente propuesta es posible llevarse implementarse y de servir para que en un futuro sea posible un rediseño en base a requerimientos

ISBN: 978-607-9394-14-1.



más concretos y de las pruebas obtenidas de esta etapa inicial. Para ello se planteó el desarrollo de un sistema de control embebido para un brazo robótico de 3 grados de libertad (GDL), donde serán controlados por medio de servomotores y motor a pasos respectivamente que sirva de aplicación de robótica asistencial en los procedimientos de la toma de ultrasonidos de vesícula biliar, con el objetivo de facilitar el trabajo del radiólogo, disminuyendo problemas como el temblor debido a la fatiga muscular y mejorando la precisión en el procedimiento. El sistema de control se basa en un sistema embebido Placa Intel Galileo I, un brazo robótico de 3GDL y de un controlador de tipo teach-pendant con joysticks, a partir de los cuales se envían y reciben las coordenadas que permiten el control de cada eje de los diferentes motores con los que cuenta.

El presente artículo está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se describe la configuración del sistema embebido. En la sección 3 la propuesta de programa para la placa Intel Galileo Generación. En la sección 4, se presenta las pruebas realizadas con el sistema embebido que sirve de controlador con los motores del robot de 3GDL propuesto. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del artículo y posibles opciones de mejora en el diseño del control del prototipo.

2. Configuración del sistema embebido Intel Galileo

El sistema embebido con el que fue diseñado el control del brazo robótico de 3GDL, consiste en una placa de desarrollo Intel Galileo Generación I, si bien esta placa fue desarrollada por Intel como una opción en el sector académico y que recientemente saco del mercado, la cantidad de recursos de software y de hardware con las que cuenta son descritas ampliamente en [9], estas permitieron que de forma simple se realizara su implementación en el prototipo. Las especificaciones y características técnicas de esta placa, que representaron mayor interés para el propósito que se tiene, se muestran resumidas en la Tabla 1., como son los parámetros del voltaje de alimentación y de la corriente eléctrica recomendadas para no dañar la placa.

Tabla 1. Especificaciones Placa Intel Galileo 1

Parametros	Rangos
Voltaje de entrada (recomendado)	5V
Voltaje de entrada (límites)	5V
Digital I / O Pines	14 (de los cuales 6 proporcionan PWM)
Pines de entrada analógica	6
Total Corriente de salida DC en todas las líneas de E / S	80 mA
Corriente de la CC para Pin 3.3V	800 mA
Corriente de la CC 5V para el Pin	800 mA

Esta placa está basada en la arquitectura de procesadores Intel Quark SoC X1000, y fue desarrollada bajo el entorno de desarrollo del IDE de Arduino en su versión UNO R3, por lo que también es posible el empleo de los diferentes shields y accesorios, ya que tanto el software y hardware puede ser utilizado para ambas placas. Sin embargo, una diferencia importante entre ambas y que represento mayor interés, es que la placa de Intel en su versión Galileo puede tener integrado su propio sistema operativo (SO) en una tarjeta de memoria de tipo microSD la cual se inserta en la placa desde una ranura especialmente colocada, con esto se puede realizar el booteo y carga del SO, la imagen de este sistema aún está disponible en la página oficial de Intel desde la cual puede ser descargada [10] y de las diferentes versiones que ha tenido.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 20, pp. 235-248.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1 Carga del sistema operativo e inicialización en la microSD

Como se mencionó anteriormente, para la carga del SO es necesario realiza una serie de pasos y procedimientos definidos para esta tarea ya que de no realizarlo la placa Galileo no guardara el programa en memoria y al desenergizarla de la PC esta no conservara el contenido del programa, motivo por el cual debe realizarse el procedimiento desde la microSD, estos pasos aún se encuentran disponible a través de la página de Intel como puede verificarse en [11]. Con el fin de facilitar el procedimiento, se presenta la secuencia resumida en la Figura 1, se muestra la configuración para Mac Os, y en la Figura 2, se presenta los pasos a seguir para cualquier sistema operativo mediante un diagrama de proceso. Es importante comentar que para el caso de este trabajo, se empleó una PC con el sistema operativo de Windows 8 en su mayoría de los casos, por lo que la opción de la imagen de Linux que se descargo es totalmente compatible con el SO nativo; otro dato de interés es que también existe una versión descargable para MacOS, desde la cual también se verifico este procedimiento, además de que también se encuentran disponibles versiones para algunas distribuciones de Linux, desde las cuales también se puede configurar una microSD.

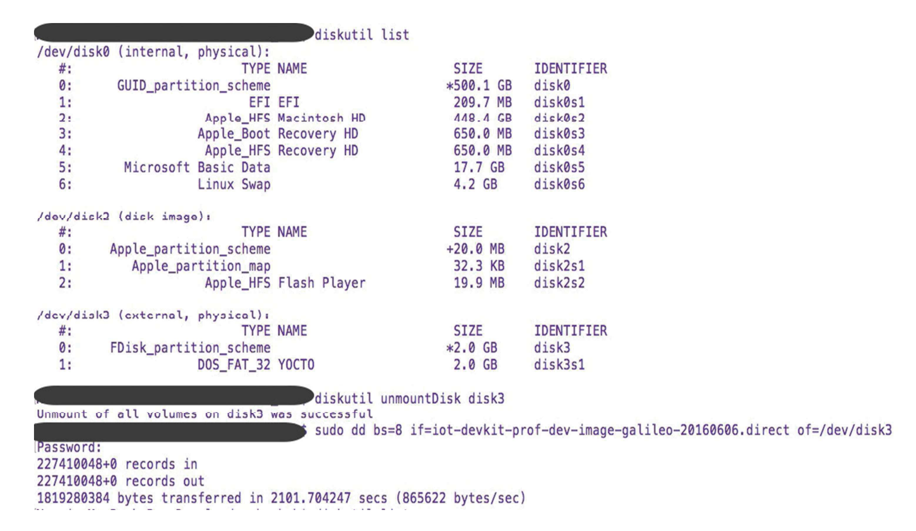
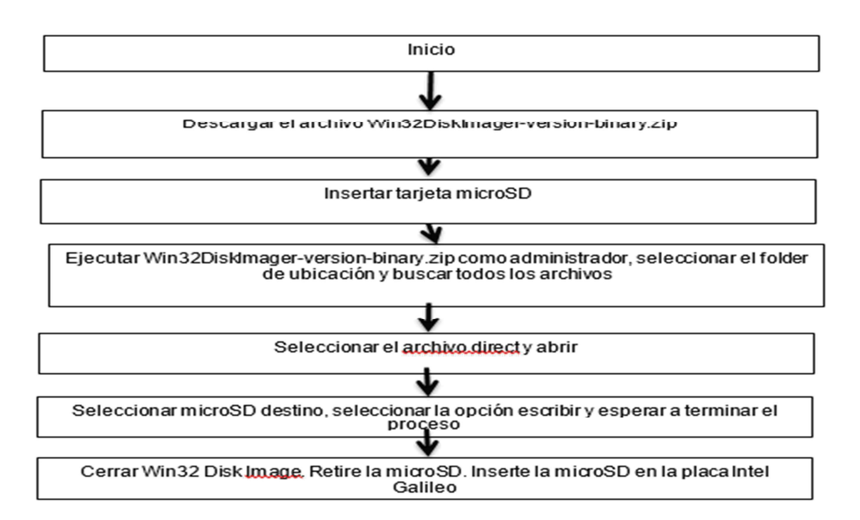


Figura 1. Proceso para la configuración de una microSD desde línea de comandos.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 2. Diagrama de proceso para la configuración de una microSD.

Para este proyecto se utilizó una microSD con capacidad de 32GB, Intel recomienda como rango valido de tarjetas desde 2GB hasta 32 GB; sin embargo, por la cantidad de datos que se leían y procesaban, se requirió cambiarla por la de mayor capacidad para evitar que después de estar trabajando con el brazo robótico, se perdieran los datos que debían leerse, ya que se saturaba la memoria y no era posible seguir trabajando con los recursos de la placa. Una desventaja de la placa Galileo y como ya se ha mencionado, es que este modelo y otros han sido discontinuados pero la información permanecerá disponible hasta el año 2020 en la página de Intel; esto se debió a cambios y restructuraciones en el mismo. A pesar de esta situación, en el Nodo CECyT 2 se contaba con una placa de este modelo y esta sirvió para iniciar la propuesta del controlador embebido con el uso de la IDE de Arduino, debido a la facilidad para utilizarse por técnicos que inician en proyectos mecatrónicos con diferentes Unidades Académicas.

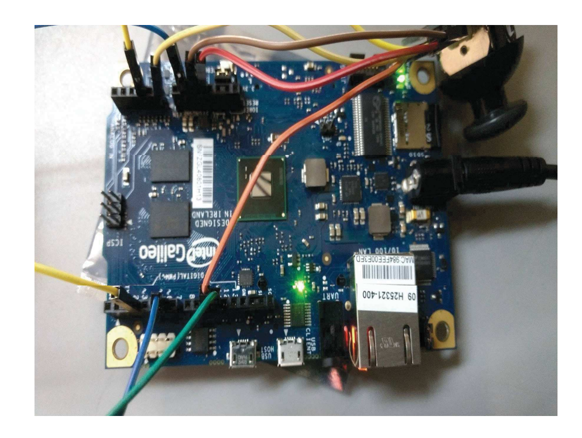


Figura 3. Carga del SO en la placa Intel desde la microSD.

2.2 Propuesta de programa para la placa Intel Galileo generación I

Para el desarrollo del programa propuesto implementado en la placa Intel Galileo 1, se tomó como referencia el sistema mostrado en la Figura 4, el cual está integrado por el brazo robótico de 3GDL, así como de los diferentes sistemas que componen el prototipo completo con el que se cuenta.

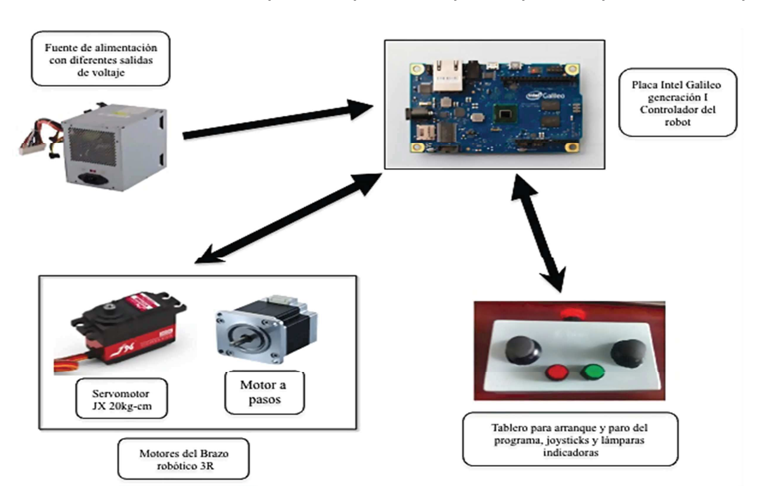


Figura 4. Sistemas que integran al brazo robótico de 3GDL.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Después de concluir el proceso de reconocimiento del sistema operativo en la placa, el siguiente paso fue realizar los programas correspondientes para la comunicación de los datos leídos por el joystick, estos serán enviados como órdenes de posición a los diferentes motores que tiene el robot. La programación realizada fue en lenguaje C y la IDE de Arduino, siendo el programa del Joystick el que tiene mayor relevancia, puesto que será desde este que las ordenes se reciban y envíen hacia el brazo robótico, en la Figura 5, se presenta dicho código.

```
pruebajoystick §
#include <Servo.h>
Servo servo1, servo2, servo3;
const int pinServo1=3;
const int pinServo2=6;
const int pinServo3=11;
const int pulsoMin=700;
const int pulsoMax=2700;
const int joyy=A0;
const int joyx=A2;
const int joyz=10;
int valorx, valory, valorz;
int angulo1, angulo2, angulo3;
void setup() {
  servo1.attach(pinServo1,pulsoMin,pulsoMax);
  servo2.attach(pinServo2,pulsoMin,pulsoMax);
  servo3.attach(pinServo3,pulsoMin,pulsoMax);
  pinMode(joyz,INPUT);
}

void loop() {
  valory=analogRead(joyy);
  valorx=analogRead(joyx);
  valorz=digitalRead(joyz);
  angulo1=map(valory, 0, 1023, 180, 0);
  angulo2=map(valorx, 0, 1023, 180, 0);
  angulo3=map(valorz, 0, 1, 180, 0);
  servo1.write(angulo1);
  servo2.write(angulo2);
  servo3.write(angulo3);
  delay(20);
}
```

Figura 5. Programa principal.

Dentro del programa puede observarse que se incluye la biblioteca “servo.h”, al trabajar con el mismo IDE de Arduino las mismas funciones y bibliotecas pueden utilizarse para la placa Galileo. Para ello, lo primero es crear un objeto para el servo y ligarlo con su correspondiente pin con el que se controlara, para esta asignación de los pines se empleó la función write(), en la cual se puede enviar la posición del servo actual a la esperada, por otro lado, y con el fin de controlar la velocidad del mismo puede utilizarse una instrucción delay(), con la cual se ajustan los pulsos de PWM que son enviados de forma digital. En la placa Intel Galileo se realiza la lectura de la posición que tienen los joysticks, permitiendo además su lectura de valor y el enviar las señales obtenidas a los servomotores, lo cual se ve expresado en el movimiento de los motores a la posición deseada de las articulaciones del brazo robótico. Sin embargo, este procedimiento demandaba una gran cantidad de recursos, es decir de lectura y procesamiento de datos a la placa, la cual se vio limitada por una memoria de 256MB instalada físicamente y puede incrementarse por medio de la microSD, por este motivo fue necesario utilizar el tamaño máximo para una tarjeta externa que es la de 32GB, una vez instalada y ejecutando el programa principal directamente en la misma, los problemas de perdida de datos se eliminaron por completo. Otro detalle de interés se debe a que por el momento el lazo de control desarrollado funciona de la siguiente manera: primero se envían los datos desde el teach-pendant (joystick) a la placa Galileo, esta a su vez envía los mismos hacia los motores, sin embargo, aún no se tiene una retroalimentación de los datos proporcionados de los motores a la placa. Los motores que permiten el movimiento de las articulaciones del brazo robótico son los siguientes, un motor a pasos (p-p) para la base, un servomotor para el brazo y otro para el antebrazo. En la Figura 6, el diagrama de conexión del circuito de control electrónico se muestra el diagrama esquemático del circuito de control del robot y en la Figura 7 su diagrama pictórico, diseñado en el software Fritzing.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



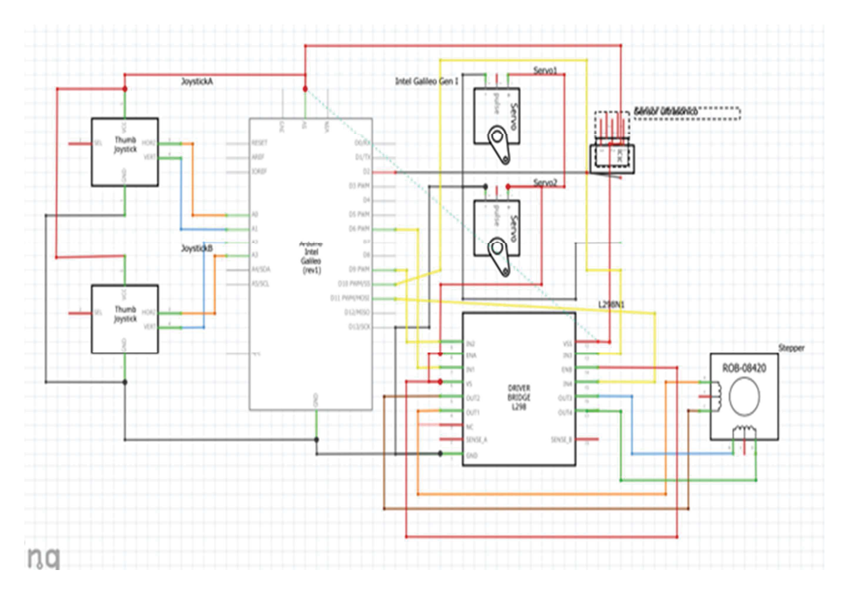


Figura 6. Diagrama de conexiones del circuito de control.

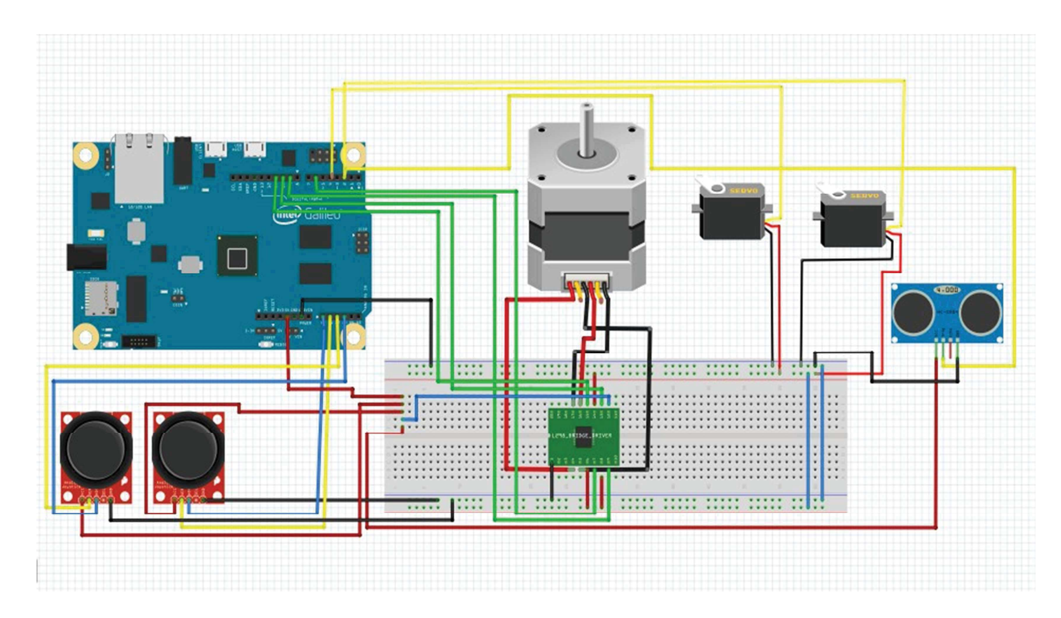


Figura 7. Diagrama pictórico en Fritzing.

De la Figura 7, podemos resumir las diferentes conexiones que la placa Intel Galileo tendrá con cada uno de los diferentes dispositivos, estos pueden apreciarse con mayor detalle en la Tabla 2 que muestra los pines de conexión físicos:



Tabla 2. Conexiones de los dispositivos y la placa Intel Galileo

Dispositivo	Pin de la placa
Joystick1	Eje x → Pin A0 (Entrada) Eje y → Pin A1 (Entrada)
Joystick2	Eje y → Pin A2 (Entrada)
Sensor ultrasónico	Trigger → Pin 7 (Salida)
Controlador de motor a pasos	In 1 → Pin 6 (Salida) In 2 → Pin 9 (Salida) In 3 → Pin 10 (Salida) In 4 → Pin 11 (Salida)
Servomotor 1	Señal → Pin 3 (Salida)
Servomotor 2	Señal → Pin 5 (Salida)

2.4 Sistema de accionamiento para el brazo robótico de 3GDL

El sistema de accionamiento está integrado por elementos que transmiten los movimientos de motores y de actuador a los eslabones del manipulador [8]. Estos elementos motrices, pueden ser según el tipo de energía que consuman, de tipo hidráulico, neumático y eléctrico. En el presente trabajo el tipo de motores que se emplearon para estructurar los grados de libertad del brazo, son de tipo eléctricos, estos dispositivos son los encargados de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, gracias a la acción de los campos magnéticos que se crean en las bobinas que los componen, la energía eléctrica hace que los campos magnéticos desplacen fuerzas que dan como resultado el desplazamiento del rotor, que, al estar fijado al estator, se desplaza en un movimiento giratorio. En la tabla 3 se muestra las características técnicas de los elementos motrices que se utilizaron en la construcción del brazo robótico de 3GDL y en la tabla 4 se observan las características eléctricas de los elementos que integran al brazo robótico de 3GDL.

Retomando las caracteristicas eléctricas del sensor ultrasónico HC-SR04 como se muestra en la tabla 4 se puede observar que el rango mínimo para el senseo es de 1.7cm y de acuerdo con la formula aplicada como se muestra en la ecuación 1 se obtuvo el tiempo de respuesta.

$$t = \frac{s}{v} \tag{1}$$

Donde: t es Tiempo
s es Distancia
v es Velocidad del sonido

Una parte esencial para el prototipo es la alimentación, ya que debido a que la placa es sensible a las variaciones de voltaje, únicamente se empleó la fuente de alimentación con salida a 5VCD y con un rango de corriente de 1.5 - 3A que contiene el kit, la potencia total de la placa es de 12.5 W. Sin embargo, la demanda de voltaje de los motores requirió que adicionalmente se colocara una fuente externa de computadora la cual tenía salidas a 5VCD y 12VCD, los cuales se utilizaron para la alimentación del motor p-p, el cual también está conectado al driver L293, el cual está montado en un módulo especial, el cual sirve para evitar dañar el mismo puesto que soporta hasta 36VCD y 2000mA de corriente.



Tabla 3. Características técnicas de los elementos motrices

Componente	Características técnicas
Motor a pasos 23KM- C05-07V	Step angle : 1.8 Spindle type Â round Spindle Diameter: 6.5 mm Spindle Length: 23 mm Voltaje de trabajo: 4.5V Intensidad por bobina: 1.5A
Servomotor JX PDI- 6221MG 20Kg-cm	Working frequence: 1520us / 330hz Operating Speed (4.8V): 0.18 sec/60° Operating Speed (6V): 0.16 sec/60° Rotational Range: 0º - 180º. Stall Torque (4.8V): 17.25 kg.cm (239.55oz/in) Stall Torque (6V): 20.32 kg-cm (281.89 oz/in) Dimensions: 40.5X20.2X38mm /1.59 X0.80X49 in
Servomotor JX PDI- HV2060MG - 60Kg-cm	Standard PWM: 850-2150uS. Motor: High quality core motor. Operating Voltage: DC 6.0V-7.4V. Operating Temperature Range: -20ºC — +60ºC Operating Speed: (6.0V) 0.15 sec/60º Operating Speed: (7.4V) 0.13 sec/60º Stall Torque: (6.0V) 48kg.cm Stall Torque: (7.4V) 62kg.cm

Tabla 4. Características eléctricas

Componente	Características técnicas
Joystick	handle operating angle: ±30° (60° overall) X & Y axis Max. operating force: <20mN handle pattern: 360°(Omni-directional) Resistance: 10K ohms ± 30% Maximum voltage: 30VDC
Sensor ultrasónico HC- SR04	Tensión de alimentación: 5 VDC Frecuencia de trabajo: 40 KHz Rango máximo: 4.5 m Rango mínimo: 1.7 cm Duración mínima del pulso de disparo (nivel TTL): 10 µs. Duración del pulso eco de salida (nivel TTL): 100- 25000 µs. Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra 20 ms.

En el caso de los servomotores fue necesario adicionar un banco de capacitores que permitieran estabilizar la tensión de los servomotores debido a los constantes picos de consumo que requieren, por lo tanto la forma más eficaz que se encontró fue incorporar 2 capacitores de tipo electrolítico de 2200uF a 50VCD, para evitar que el consumo de corriente demandada al arranque de los servomotores y debido a la forma de trabajo por medio de pulsos variables hacen que el servomotor vibre y produzca un efecto que se llama “torque ripple” (rizado de par) que tiene dos vertientes: la mecánica y la eléctrica, desde el punto de vista mecánico es una vibración que supone un desgaste de engranajes y desde el punto de vista eléctrico supone una oscilación constante de la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



intensidad y descargas de corriente, estos son colocados entre las terminales de alimentación del mismo (en paralelo a las terminales de alimentación del servomotor), esto se debe a que cuando está trabajando el consumo de corriente aumenta y por lo tanto el voltaje disminuye, se debe de tener un extremo cuidado debido a que deben ser polarizados de acuerdo a las especificaciones de conexión de los capacitores.

En las siguientes referencias se puede profundizar en diferentes aplicaciones de sistemas embebidos aplicados en la robótica como es [13], [14] y [15].

4. Pruebas realizadas al sistema propuesto

Finalmente, para validar y verificar que la programación realizada en la placa Intel Galileo se realizaron una serie de pruebas que corresponden desde la puesta en marcha del sistema operativo en la microSD, las cuales serán descritas con mayor detalle a continuación:

a) Prueba 1 Sistema operativo en la placa. En esta prueba se verifico que la microSD booteable se carga el sistema operativo de la placa mediante las señales de los leds indicadores de encendido (power) y la de lectura (para la microSD), posteriormente se ejecutó el programa y las instrucciones programadas fueron leídas. Sin embargo, durante la realización de la primera prueba se tuvo el inconveniente de una perdida de los datos debida a la capacidad de la misma placa y por la capacidad muy limitada de la micro SD de 8GB que inicialmente se tenía, la cual fue sustituida por otra de mayor capacidad. Los datos enviados y recibidos que se tenían en el programa inicial que son enviados y recibidos con la placa no eran correctos, para ello se realizó una segunda prueba con una microSD de 16GB, sin embargo, al momento de ejecutar el programa este seguía presentando inconvenientes en la lectura de los datos. Por lo que fue necesario probar en una microSD de 32GB, una vez ejecutado el programa la lectura de los datos se presentó sin problema. En la Figura 8, se muestra una de las pruebas iniciales de los datos leídos del joystick y enviados a los servomotores sin carga.

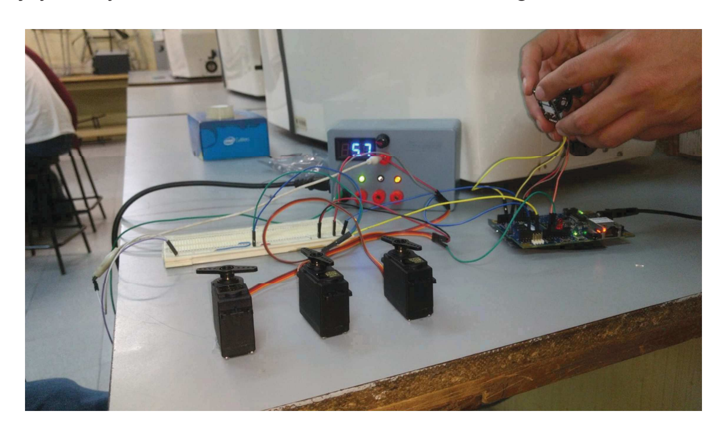


Figura 8. Prueba de servomotores sin carga.

b) Prueba con carga de los motores del brazo robótico con la placa Intel Galileo. En esta etapa y debido al poco tiempo para el desarrollo de la etapa uno de potencia completa del proyecto, ya que fue necesario modificar la estructura inicial de aluminio por una en acrílico de 3mm, debido a que es más ligera, como ya se mencionó en las pruebas de carga los motores con los que se contaba no tenían el torque necesario para mover las articulaciones del brazo robótico y no se contaba con la opción de cambiarlos por el momento, puesto que ya se tenía construido el brazo robótico de 3GDL. Además, fue necesario que la placa y los diferentes motores tuviesen fuentes de alimentación separadas para evitar que la placa sufriera alguna demanda excesiva durante su operación. En la Figura 9, se presenta la estructura final del

ISBN: 978-607-9394-14-1.



brazo robótico de 3GDL en su diseño en CAD y de forma física para el prototipo en el laboratorio.

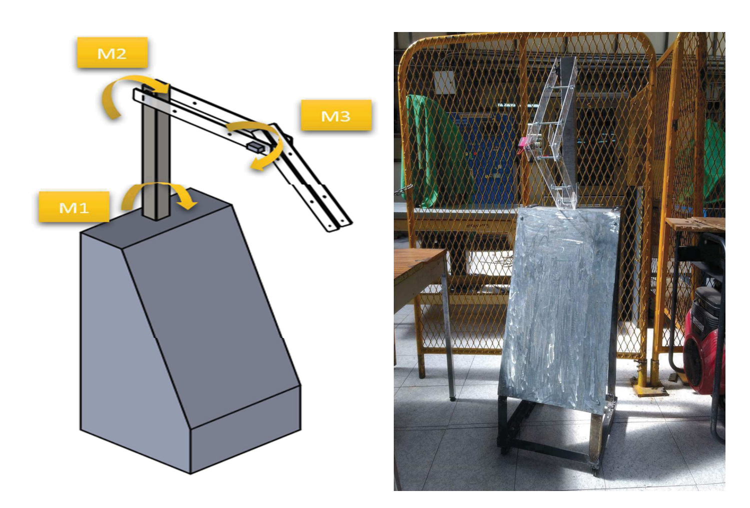


Figura 9. Brazo robótico 3GDL motores.

c) Prueba sensor ultrasónico con la placa Intel Galileo. Este sensor es necesario para garantizar que el brazo robótico no impactará directamente con alguna superficie y que al detectar un objeto este bloqueará el control del joystick por seguridad del operador.

Aplicando la ecuación 1, considerando que la velocidad del sonido es de 0.034cm/µs, y que el rango de senseo máximo que se obtuvo fue de 5 cm como se muestra en la figura 10, para que pudiera detectar algún obstáculo y mandar la señal de paro a los servomotores en un tiempo de respuesta, se obtuvieron los siguientes resultados como se muestra en la tabla 5.

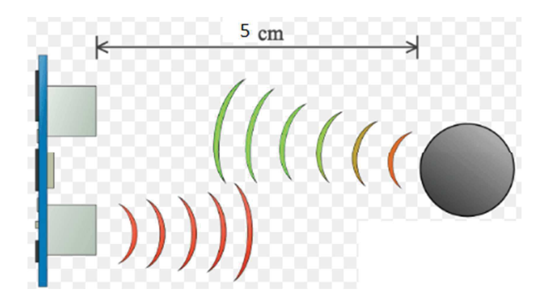


Figura 10. Tiempo de respuesta - distancia

Tabla 5. Resultados de tiempo de respuesta del Sensor HC-SR04

Tiempo (t)	Distancia	Velocidad
147 µs	5 cm	0.034cm/µs
117 µs	4 cm	0.034cm/µs
88 µs	3 cm	0.034cm/µs
50 µs	1.7 cm	0.034cm/µs

ISBN: 978-607-9394-14-1.



d) Prueba de validación. El brazo robótico realizo una correcta simulación de toma de ultrasonidos. Se logró manipular correctamente mediante el uso de los joysticks y el sensor ultrasónico cumplió la función de detener el robot de una posible colisión. Esta prueba fue realizada en un espacio destinado para la toma de ultrasonidos y se pudo comprobar que el tamaño y el área de desplazamiento fue favorable, en la figura 8 se muestra una imagen tomada dentro del espacio.

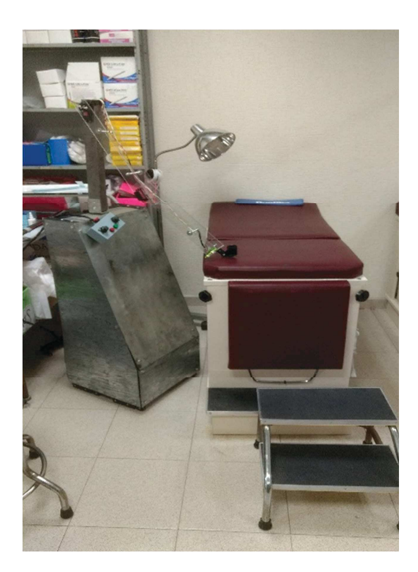


Figura 8. Prueba de validación

5. Conclusiones

Finalmente al concluir con el desarrollo del proyecto se obtuvieron resultados importantes y de gran interés, como lo fue el diseño y puesta en marcha del controlador, puesto que el uso y aplicación de sistemas embebidos ha crecido en años recientes, ya que se logró proponer y validar una opción más a través de una placa de desarrollo Intel Galileo Generación 1 en esta etapa de prueba, aun cuando esta ha sido discontinuado en este año; eso no fue un motivo para que no fuera posible proponer una metodología de control de un prototipo de brazo robótico con el que ya se contaba, si bien se tuvieron algunos inconvenientes en el proceso de construcción e implementación, estos fueron resueltos satisfactoriamente con un simple cambio en la estructura y capacidad de la microSD, el brazo robótico logro cumplir con la tarea para la cual fue programado y a su vez con la validación de la propuesta de control, esta etapa fue muy importante debido a que se verifico la etapa de manipulación del brazo por medio de pruebas con un sensor ultrasónico en sustitución del transductor que se emplea en la toma de ultrasonidos de vesícula biliar.

Por otro lado, también fue posible la formación de recursos humanos a nivel técnico, la difusión del mismo proyecto en diferentes eventos a lo largo de 2017, como lo fueron la presentación de un poster en un evento de becarios en el Instituto Politécnico Nacional (IPN), ponencia en evento de becarios de nivel medio superior en el IPN, ponencia en la III Conferencia de la Asociación Latinoamericana de Investigación en Educación en Ciencias y la presentación de poster en el 6to Encuentro Anual de la Red de Experto en Robótica y Mecatrónica del Instituto Politécnico Nacional.

Como trabajo a futuro se espera poder adaptar un transductor en sustitución del sensor ultrasónico con el que cuenta actualmente, además de realizar un cambio de material en la estructura

ISBN: 978-607-9394-14-1.



del brazo robótico 3GDL que por ahora es de acrílico, puesto que derivado de los resultados de las pruebas pudo comprobarse que es posible una reconfigurabilidad del mismo.

6. Agradecimientos

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaria de Investigación y Posgrado por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo mediante la aprobación del proyecto de investigación SIP-20171772 y SIP20180176, así como de los alumnos tesistas Álvaro Flores Severiano, Jonathan Gayosso Galindo, Marcos Guerrero Morales y Daniel Tafoya Sánchez quienes desarrollaron una parte muy importante en el proceso de construcción del prototipo.

Referencias.

[1] Aceves M and Ramos J. "*Sistemas embebidos aplicaciones y tendencias"*, Asociación Mexicana de Mecatrónica, AC, México, 1st ed. 2016, pp 13-18.

[2] Salas S. "*Todo sobre sistemas embebidos. Arquitectura, programación y diseño de aplicaciones prácticas con el PIC18F",* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC),1st ed. 2015, p. 38.

[3] Córdova A, Dupeyrat, Garth H. Ballantyne. "*Minimally Invasive & Telerobotic Surgery Institute".* Hackensack University Medical Center. Hackensack, New Jersey, USA. Revista de Gastroenterología del Perú v.23 n.1. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=s1022-51292003000100008&script=sci_arttext.

[4] Escolano C, Mínguez J. "*Sistema de teleoperacion multi-robot basado en interfaz cerebro-computador",* Revista Iberoamericana de Automática e informática industrial, Comité español de automática, Vol. 8, Numero 2, pp.16-23, 2011.

[5] Henao Y, Montoya C, Jiménez R. *"Exoesqueleto para control de brazo robótico",* Tendencias en Investigación de los Semilleros de investigación en ingeniería electrónica, Universidad Santo Tomas Bogotá Colombia, pp 28-31, Bogotá, 2014.

[6] Boctor, E. M., Choti, M. A., Burdette, E. C., & Webster III, R. J. (2008). Three-dimensional ultrasound-guided robotic needle placement: an experimental evaluation. *The International Journal of Medical Robotics + Computer Assisted Surgery : MRCAS*, *4*(2), 180–191. http://doi.org/10.1002/rcs.184

[7] Cabrera J, Velasco J, *"Diseño e implementación de un sistema embebido para el procesamiento de señales ultrasónicas".* Revista Colombiana de Física, Vol. 43, No 1, pp. 100-104, Colombia, 2011.

[8] Ruiz D, Vera Z, Betancur M, Bustamante J, *"Cirugía Robótica mínimamente invasiva: análisis de fuerza y torque"*. Revista de Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES, Medellín Colombia, pp. 84-92, Medellin,2010.

[9] "Galileo Board User Guide". Support and documents Intel. Feb. 2017, Intel. https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/processors/embeddedprocessors/galileo_boarduserguide_330237_002.pdf

[10] Intel Galileo Board". Download center. Feb. 2017, Intel. https://downloadcenter.intel.com/es/product/78919/Board-Intel-Galileo

[11] "Get started Galileo on windows". Intel Software. Feb. 2017, Intel. https://software.intel.com/es-es/get-started-galileo-windows

[12] Kumar, S. "*Introducción a la Robótica"*, McGraw-Hill Interamericana de España S.L España, 2010.

[13] Luckman A, Agajo J ,Gana J, Adesina M, Yakubu Y, " *Learning of embedded System Design, Simulation and Implementation: A Technical Approach",* American Journal of Embedded Systems and Applications, Vol. 3, No. 3, pp. 35-42. 2016. Doi: 10.11648/j.ajesa.20150303.12

[14] Ajao L, Agajo J, Kolo J, Ahmed A, Inalegwy O, Nuhu B, *"Embedded System Based Internet og things for smart Home/office Appliances Control using Wi-Fi Technology",* Second International Engineering Conference (IEC), Federal University of Technology, Minna, Nigeria, pp. 405-412, 2017.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[15] Qamar J, Fazlullah K, Muhammad N, Haroon K, Syed R, Farman U, *"Embedded Systems supporting by Different operating systems",* International Journal of Scientific Research in Science Engineering and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 664-673, Nigeria, 2016.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 249-260.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de Robot para Inspección Visual de Ductos

Cruz Briseño Gustavo, Guillén Soto José María, Rodríguez Olguín Luis Enrique, Soto Cajiga Jorge Alberto y Gómez Hernández Alejandro

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702. Desarrollo San Pablo. C.P. 76125 Querétaro, Qro. México
Teléfono: 2 11 98 00 ext. 5129

Resumen

Este artículo presenta la propuesta de un sistema mecánico y un sistema electrónico para un robot inspeccionador de ductos, tomando como antecedentes investigaciones previas de robots instrumentados para el mismo fin. El sistema mecánico está enfocado para ductos de 12 pulgadas de diámetro, cuyo diseño y simulaciones se realizan en el software de diseño Solidworks. Para la validación del robot se diseñó un circuito de pruebas en el cual se analizaron las secciones de recorrido crítico que podría presentar el robot para la inspección. Las simulaciones comprueban que el robot es capaz de evadir posibles obstáculos que se pueden presentar en su recorrido por el ducto, estos pueden ser limadura de acero o escoria, cordones de soldadura, derivaciones tipo "T", codos, bridas, entre otros. Se considera que el tubo puede contener gases o vapores que podrían ocasionar una explosión por lo que el diseño del robot considera la norma IEC 60079, principalmente para proteger a los motores, las tarjetas electrónicas y el sistema de visión e iluminación.

Palabras clave: Inspección de ductos, robot instrumentado, sistema de visión.

1. Introducción

Existen alrededor de 3,5 millones de líneas en tuberías alrededor del mundo. Este sistema ha provisto un medio confiable para la transporte de hidrocarburos por aproximadamente *100* años. Una gran cantidad de ese sistema de líneas ha alcanzado, o pronto lo hará, el fin de su vida útil para el cual fue diseñado. Muchas de las líneas operan en ambientes hostiles, transportando productos corrosivos, y como resultado sufren daños antes que otras. Se estima que aún restan entre *40* a *60* años en reservas de petróleo y gas, consecuentemente mucha de la existente infraestructura seguirá operando durante los años venideros. Las tuberías requieren una inspección para detectar defectos como la corrosión, las grietas, laminaciones, deformaciones, etc., por lo tanto, es necesario la inspección y rehabilitación para asegurar una operación continua, segura y confiable [1].

Se han empleado a lo largo de los años diversas técnicas no destructivas para la detección de los distintos tipos de defectos que una tubería usualmente presenta [2]. Estos defectos pueden ser determinados mediante la observación en la variación del espesor de la pared así como de sus propiedades físicas [3].

Desde la fabricación del primer PIG *(Pipeline Inspection Gauge)*, se ha perseverado en la innovación de diversas tecnologías para distintas circunstancias, tales como variaciones de diámetros de tuberías y funcionalidad. Los PIGs generalmente se constituyen de: módulo de sensores, sistema de odómetros, sistema de navegación inercial y módulo de baterías. Sin embargo necesitan de un



fluido que propulse el sistema, es por ello que se genera la propuesta del robot inspeccionador con cordón umbilical, que puede ser útil en instalaciones que lo permitan [4].

Se presentará el desarrollo conceptual de un robot inspeccionador para tuberías de *12*'' de diámetro con el propósito de cubrir el recorrido en el circuito de ductos propuesto, el robot incluirá un sistema de visión e iluminación para que, en una primera instancia se pueda realizar la inspección visual del interior de la tubería. El robot incluye un odómetro para medir la distancia de recorrido del robot y poder así correlacionar las indicaciones encontradas con la ubicación. El diseño propuesto solo llega a la etapa de simulación donde se pretende inferir el comportamiento del robot en su recorrido dentro del ducto.

1.1 Métodos para inspección de tuberías

La forma más eficiente de transportar fluidos es utilizando tuberías (o ductos), no obstante dichas tuberías están expuestas a diferentes agentes que pueden provocar fallas y en algunos casos accidentes o catástrofes. Por lo que por norma todas las empresas e instituciones que cuentan con instalaciones de tuberías que transportan materiales que puedan causar daños ecológicos, sociales o a particulares deben ser inspeccionadas con periodicidad para garantizar su integridad y reducir el riesgo de fallas de las mismas.

Cuando las tuberías son de acceso fácil y seguro, pueden ser inspeccionadas de forma manual y/o automática desde su exterior, no obstante cuando son de acceso difícil y/o peligroso, la opción más práctica y segura es inspeccionar automáticamente, y en la mayoría de las veces desde su interior. Lo que requiere de introducir y desplazar equipos instrumentados por el interior de las tuberías.

Existen diferentes tecnologías para la inspección interna y automática de tuberías, entre las cuales se encuentran: Los equipos de propulsión externa (PIGs), que usualmente se desplazan por la tubería debido a un diferencial de presión generado en la tubería. Y los equipos de propulsión interna, conocidos como PICs (*pipeline inspection crawler*) que incluyen algún tipo de actuador para desplazarse de forma autónoma en el interior de la tubería. Ambos pueden incluir la instrumentación de tipo visión, geómetra, caliper, flujo magnético y/o ultrasonido para realizar la inspección de la tubería.

Los equipos geómetra y caliper pueden inspeccionar deformaciones plásticas y reconstruir la trayectoria de la tubería, los equipos de flujo magnético pueden dar información cualitativa del estado de la tubería y los equipos ultrasónicos información cuantitativa, principalmente para la detección y caracterización de corrosión, problema responsable de alrededor del *20*% de las fallas de las tuberías. La inspección visual por cámaras de visión requiere de interpretación y conocimiento de defectos posibles en las tuberías y se pueden identificar, deformaciones, objetos extraños, corrosión a cierto nivel, grietas visibles, entre otras [5].

Cuando la velocidad de inspección es elevada, más de *1* m/s, normalmente se utilizan los equipos PIG's, los cuales incluyen tantos sensores para cubrir al máximo la circunferencia de la tubería a inspeccionar y tomar la medición en un solo recorrido (no hay reversa, ni freno). Pero cuando la velocidad de inspección es baja, menos de *1* m/s, se puede utilizar PIC's, que pueden incluir menos sensores, pero se pueden hacer rotar para inspeccionar la circunferencia completa, aprovechando la ventaja de que el equipo se puede detener y hasta aplicar reversa. Además con estas ventajas se puede realizar una inspección visual utilizando el sistemas de visión apropiado.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



A continuación se muestra como ejemplo una imagen de un PIG de ultrasonido [4].

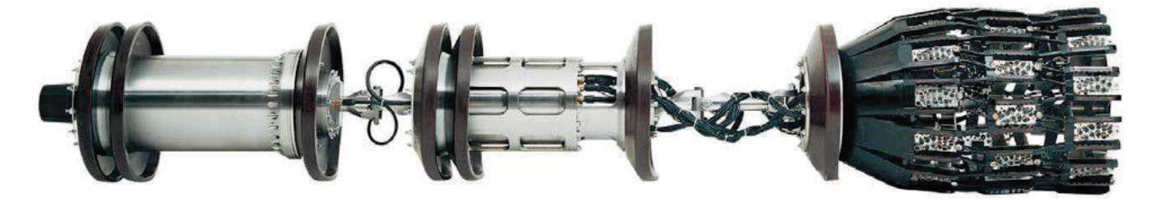


Figura 1. PIG de ultrasonido [12].

Este PIG, incluye la tecnología de ultrasonido con más de 300 transductores de ultrasonido como se aprecia en el módulo posterior de la imagen. En el módulo central se incluye la electrónica de ultrasonido, que incluye generación y adquisición de señales, pre-procesamiento y almacenamiento de las mismas. Finalmente en el módulo frontal se incluyen las baterías y el sistema de navegación.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de un PIC [6].

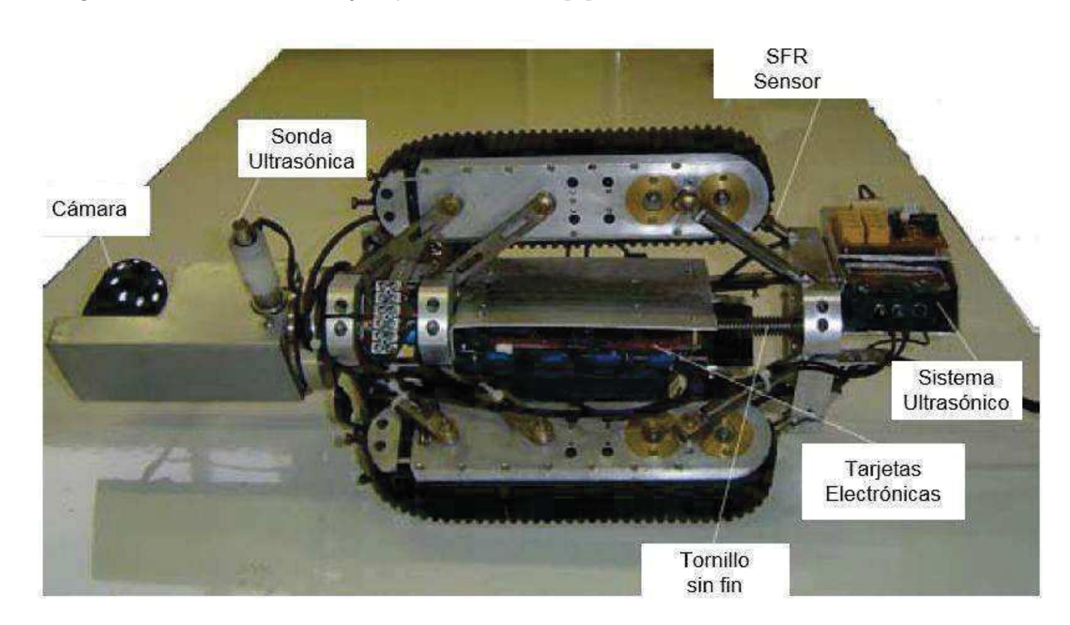


Figura 2. Robot PIC de ultrasonido [6].

Este PIC tiene la capacidad para moverse dentro de tuberías horizontales y verticales de diámetros entre 10 y 20 pulgadas. Ha sido diseñado y fabricado en el laboratorio de robótica y automatización de la Universidad Tarbiat Modares. Se pueden instalar diferentes herramientas en este robot. El robot cuenta con una cámara para monitoreo y una unidad ultrasónica para medir el espesor de pared de la tubería. La sonda ultrasónica puede posicionarse en el interior de la tubería en diferentes ángulos según lo desee el operador. Además, el diámetro exterior del robot puede variar y adaptarse al diámetro interior de la tubería, para regular la presión de contacto necesaria entre el robot y la tubería se monitorea la corriente de consumo de los motores. Todo el sistema es controlado por el operador a través de un joystick mientras se recibe la señal de video de la cámara en un monitor. El hardware del sistema de control es un microcontrolador que cuenta con salidas PWM y entradas ADC. Además, la posición y la velocidad de los motores se miden mediante codificadores.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Desarrollo

La propuesta del robot (figura 3), consta de cuatro módulos principales montados sobre el chasis, los cuales son: Sistema de tracción, que consta de 4 llantas y 2 motores. Tarjetas electrónicas, que son drivers para los motores, tarjeta de control y acondicionamiento. Sistema de cámara e iluminación, con el cual se inspecciona visualmente la tubería. Y el sistema de odometría, el cual indica la posición del robot dentro de la tubería. El sistema electrónico se conecta mediante un cable principal a una computadora, un monitor de video, un joystick y una fuente de alimentación, que se encuentran fuera de la tubería.

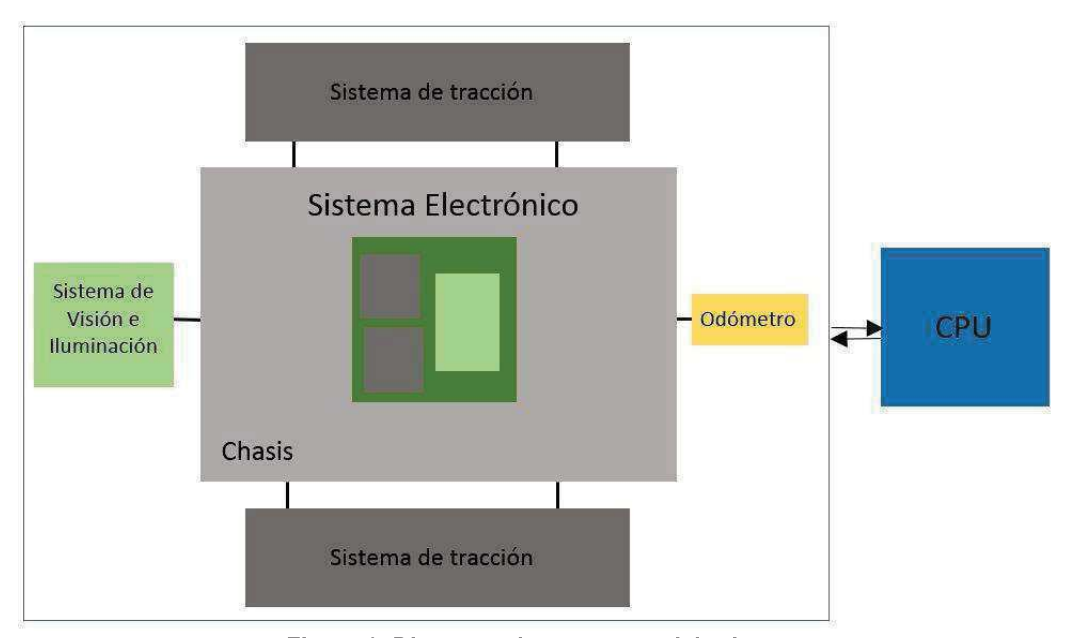


Figura 3. Diagrama de propuesta del robot.

2.1 Sistema electrónico para el control del desplazamiento de un robot de inspección de tubería.

Cada componente debe ser seleccionado según el grado de eficiencia que brinde al sistema, ya que se busca construir un sistema que opere de forma segura en un ambiente explosivo. En este proyecto es necesario agregar una envolvente antideflagrante que aloje el sistema electrónico y evitar un posible accidente cuando el robot opere en una atmósfera explosiva. Los diseños electrónicos deben ser basados en la norma IEC 60079-1 “Protección del equipo por envolvente antideflagrante”.

En la figura 4 se muestra una propuesta de la arquitectura electrónica, especificando los elementos electrónicos que se requieren. Principalmente se necesita, un driver de potencia que sea reconfigurable y que entregue una corriente máxima de 2.5 Amperes. La fuente de alimentación es de 24 Volts y la electrónica de control opera a 5 Volts, por lo que se utiliza un regulador de tensión de 24 Volts de entrada a 5 Volts de salida para energizar al FPGA, optoacoplador, amplificador operacional, transceptor RS485 y encoder.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 249-260.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



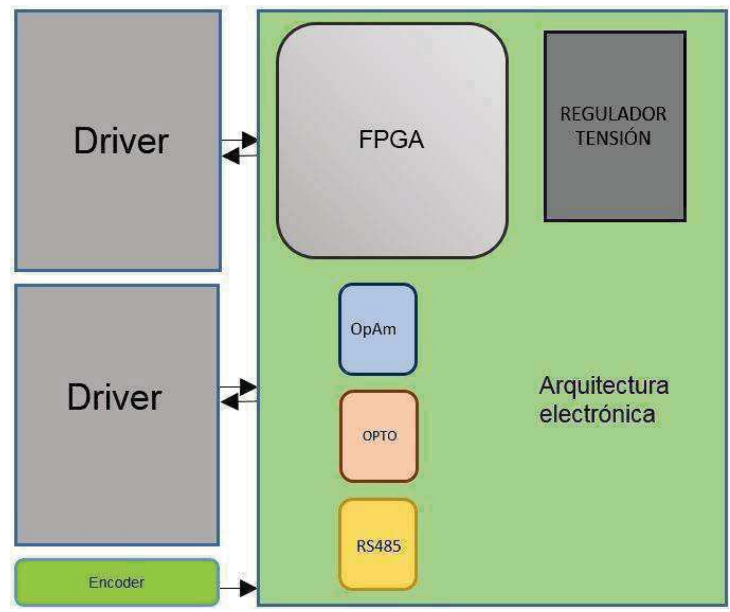


Figura 4. Propuesta de arquitectura electrónica.

En la figura 5 se observa el diagrama de bloques del funcionamiento interno de las señales del sistema electrónico. El joystick es el que indica el avance o retroceso del robot, también las direcciones izquierda o derecha, dichas señales llegan al CPU donde se realiza la interfaz de control que se comunica a través del transceptor RS485 y el cable con el FPGA. Este último procesa las señales de entrada y salida y genera las acciones de control de los actuadores en función a las indicaciones que el operador lo requiera y así desplazar el robot por el interior de la tubería.

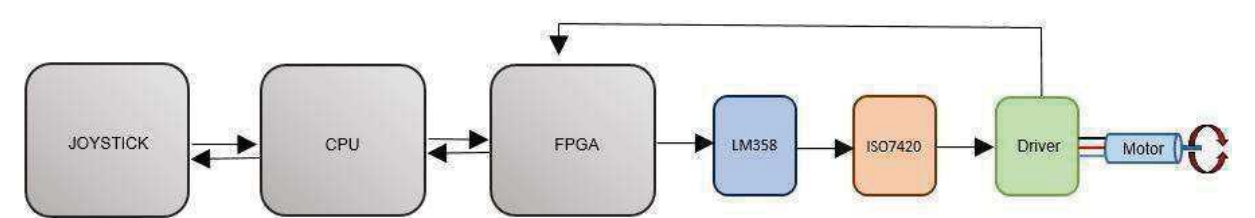


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema electrónico.

2.1 Propiedades de las tuberías y posibles fallas

Las tuberías que se pueden manejar son conforme a norma y pueden ser con costura (roladas) o sin costura (extruidas), con espesor (cédula) en función a la presión que manejan y usualmente vienen en tramos de 6 o 12 metros de longitud. Las uniones de los tramos pueden ser por cordón de soldadura o bridas y pueden presentar derivaciones tipo T o Y, no obstante el principal limitante en las dimensiones de los equipos de inspección, además del diámetro interno, son los codos, específicamente los radios de curvatura. En la figura 6 se muestra el perfil para un codo de 90° con 12” de diámetro nominal.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 21, pp. 249-260.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



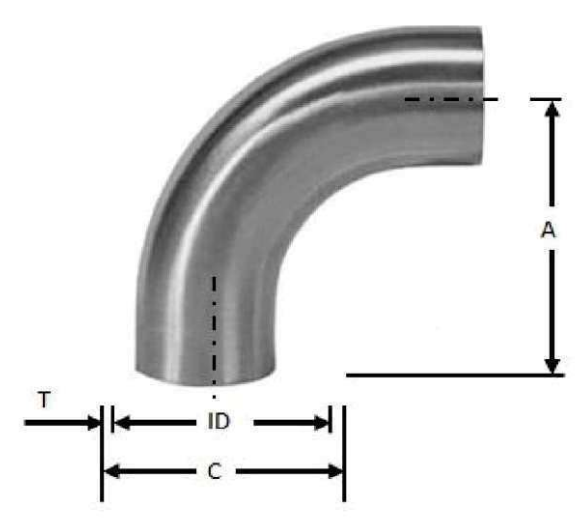


Figura 6. Codo de 90° con 12” de diámetro nominal.

Los valores correspondientes para el espesor de pared, diámetro exterior y radio de curvatura son [5]:

- Diámetro nominal (ID): 12”.
- Espesor de pared (T) para un SCH 40: 0,365”
- A: 15”

Existen diferentes falla que se pueden encontrar en la tubería, no obstante algunas están definidas conforme a normas, por ejemplo la norma ASME B31.8 (2003) define 2 principales tipos de fallas causantes de la pérdida de metal: las abolladuras (dents) y los bucklings [2]:

- **Abolladura.-** Se definen como indentaciones o distorsiones de la sección transversal circular de la tubería causada por fuerzas externas.
- **Buckling.-** Es el efecto de arrugamiento en la pared de la tubería en secciones muy pequeñas, o se define como una inestabilidad lateral.

Otro defecto comúnmente presentado es la corrosión, y del cual depende en gran medida la cantidad de espesor remanente en la tubería, el cual por norma debe tener como mínimo un 12 ,5% del diámetro interior [5]; en la Figura 7a se muestran las dimensiones para la longitud y altura de una sección de tubería que ha sufrido una severa pérdida de material. En la Figura 7b, se hace referencia de la longitud, profundidad, puntos de referencia para el inicio y fin en la detección del defecto.

2.2 Detección de fallas por el método de sistema de visión

El método para la detección de falla es mediante la técnica de visión, requiere de la experticia y conocimiento del operador que realiza la inspección, en función a esto puede identificar abolladuras, grietas, deformaciones o incluso corrosión.

En la figura 8 se describe de forma breve el concepto de captación de vídeo mediante la cámara y posterior a ello, el tratamiento a través del personal capacitado, permitiendo la detección de

ISBN: 978-607-9394-14-1.



las anomalías dentro del ducto, este es un proceso de detección visual, para el control de calidad y seguridad de la transportación de los fluidos.

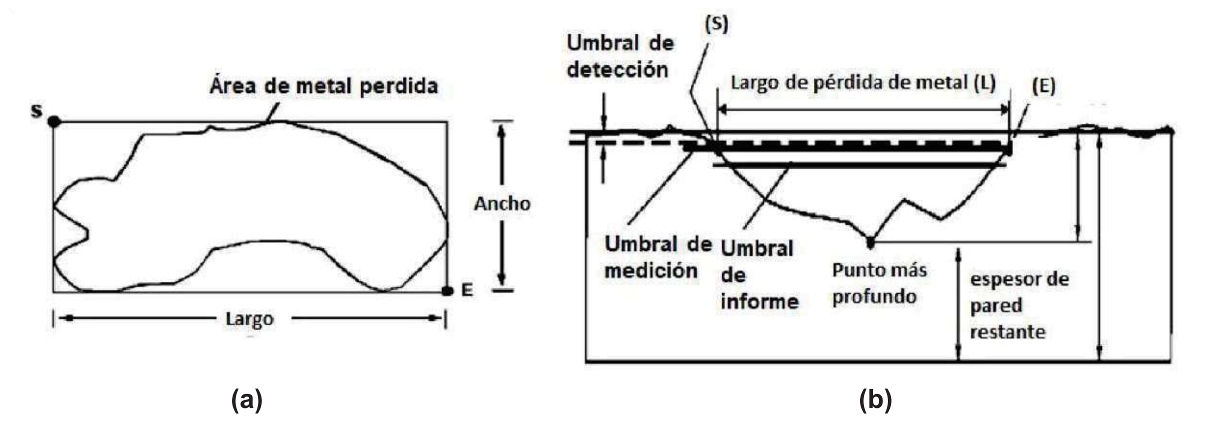


Figura 7. (a) Vista frontal de la zona dañada, (b)Vista en corte de la tubería mostrando la longitud del defecto, así como los puntos de inicio y fin para la detección de la falla.

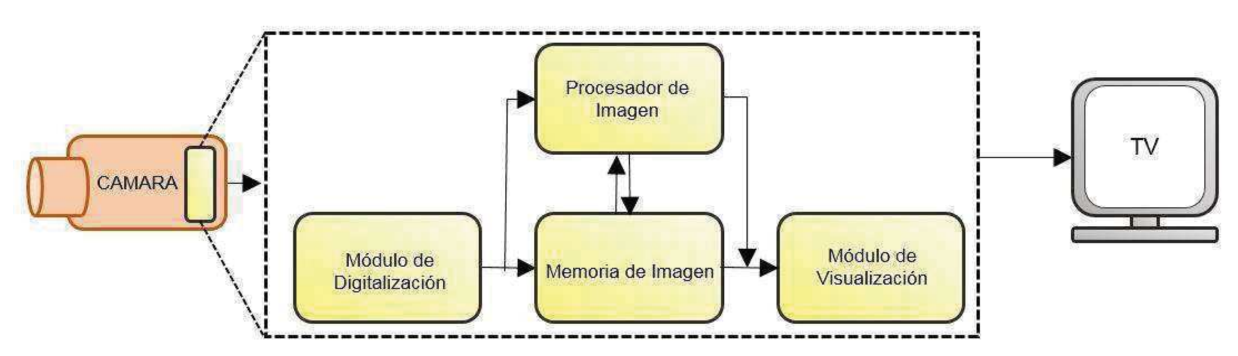


Figura 8. Proceso de captación de vídeo.

Donde el módulo de digitalización convierte la señal analógica proporcionada por la cámara a una señal digital, la memoria de imagen almacena la señal procedente del módulo de digitalización y lo envía al sistema de visualización que para poder desplegar las imágenes en el monitor de video.

El sistema de visión incluye un módulo de iluminación ya que el interior de las tuberías está completamente aislado de la luz ambiente y la cámara necesita una iluminación para completar la captación del video. Para la iluminación se elige utilizar diodos led, ya que proporciona una luz útil para la aplicación dentro del ducto, cabe mencionar que cada diodo led a utilizar disipa baja energía (500 mW).

A continuación se ilustran las posibles fallas que se podrían detectar con el sistema de visión de equipo a desarrollar.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 9. Posibles fallas identificables por visión desde el interior de la tubería.

2.3 Diseño del sistema mecánico

2.3.1 Diseño de ruedas

La propuesta del diseño de las ruedas se realiza mediante un bosquejo en 2D del diámetro interior de la tubería, este primer bosquejo ayuda a realizar el diseño 3D ya que este garantizará el área de contacto requerido entre la rueda y la pared interna de la tubería. En la figura 11 se presenta el bosquejo que se realizó, donde se define el área de contacto suficiente para brindarle estabilidad y tracción al robot.

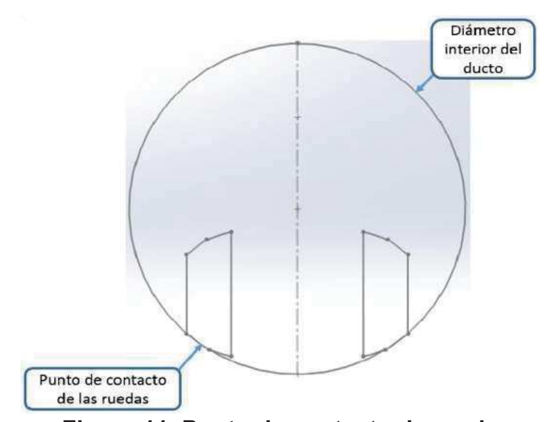


Figura 11. Punto de contacto de rueda.

Para garantizar el agarre o tracción de la rueda con la tubería, además se realiza un moleteado a las ruedas.



Figura 12. Vista de perfil de la rueda.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.3.2 Sistema de tracción

El sistema de tracción consiste principalmente de 4 ruedas actuadas por 2 motores. Para tener tracción en las 4 ruedas se realiza una transmisión por medio de cadena entre ruedas del mismo lado del robot, como se ilustra en la figura 13. La tracción en las 4 ruedas es importante debido a que pueden existir deformaciones internas en la tubería que podrían suspender hasta 2 ruedas evitando que estas tengan tracción.

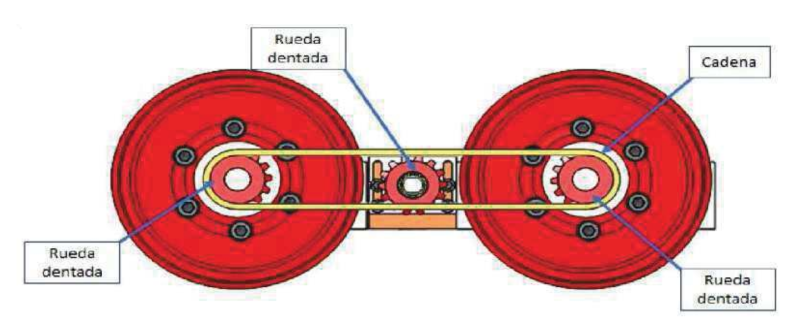


Figura 13. Vista lateral del sistema de transmisión por cadena.

En el caso del diseño propuesto en este trabajo, es posible usar la transmisión por cadena, debido a que la inspección con este equipo se realiza en ductos sin fluidos, pero no se descarta la posibilidad de realizar pruebas en ductos con fluidos, donde las correas dentadas podrían presentar signos de degradación o problemas en la transmisión del movimiento debido al fluido en el ducto.

El diseño de la tracción se da a partir de una selección de componentes disponibles en el mercado, una vez que se seleccionan ciertos componentes como rodamientos, ruedas dentadas, cadenas y motores se diseñó el chasis y se realizó el ensamble de la piezas. En la figura 14 se puede observar una vista explosionada del chasis del robot.

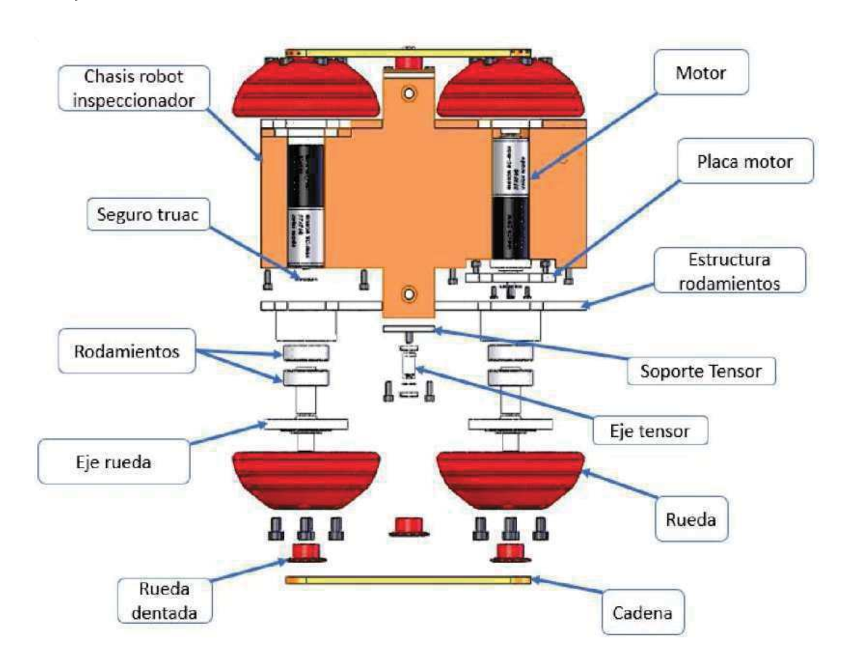


Figura 14. Componentes del sistema de tracción.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El sistema de tracción tiene una dimensión de 253 mm de largo por 216 mm de ancho, dimensiones definidas para que el robot se pueda desplazar por el interior de la tubería y pueda absorber algunas abolladuras y principalmente pasar por codos de 90°. En la figura 15 se ilustra el diseño del ensamble de la plataforma de tracción del robot de inspección.

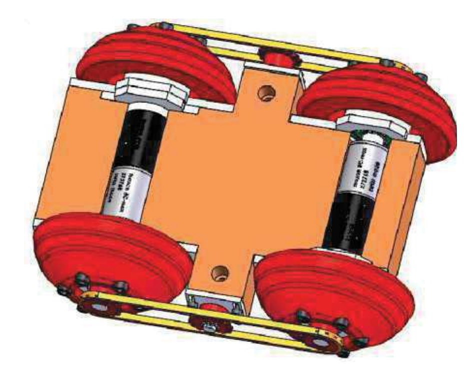


Figura 15. Ensamble del sistema de tracción.

2.3.3 Sistema de medición de distancia recorrida

Para la medición de distancia recorrida del robot y poder correlacionar ésta con las indicaciones detectadas, se propone utilizar un encoder de cuadratura adaptado a una rueda dentada la cual hace presión con la pared inferior del tubo, cuando el robot avance la rueda dentada girará y a su vez el encoder el cual mandará los pulsos al FPGA. No se considera incluir el encoder en alguna rueda del robot, ya que como se mencionó anteriormente éstas pueden tener patinamiento. En la figura 16 se muestra el sistema de medición de distancia que fue diseñado para que se pueda saber la posición del robot en todo momento, este sistema cuenta con un resorte que hace que el encoder ejerza presión contra la tubería y se tenga una buena medición.

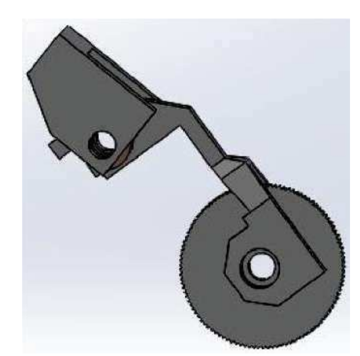


Figura 16. Sistema propuesto para adaptar el odómetro.

3. Resultados

Gracias a que el centro de gravedad se encuentra en la parte inferior del robot y a que se propone que el robot se fabrique de un material pesado, se otorgará al robot mayor agarre a la superficie del ducto, adicionalmente las ruedas del robot cuentan con un moleteado lo cual hace que se mejore aún más la tracción.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El robot cumple con los criterios de inspección, visual del interior de un tubería según las simulaciones (figura 17). Las simulaciones y diseño inspiraron implementar otro tipo de instrumentación sobre el robot que pudiesen utilizarse para la inspección a futuro, es por ello que el diseño de la cápsula del sistema de visión y la envolvente de alojamiento de la electrónica se consideran como adaptables para poder reemplazarlas por la instrumentación que convenga.

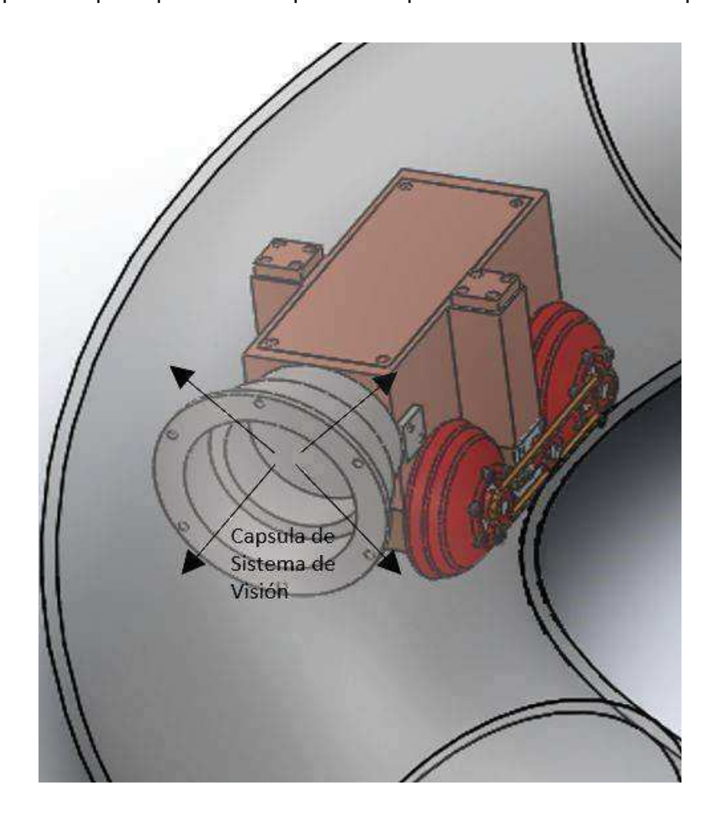


Figura 17. Simulación del robot dentro del codo.

4. Conclusiones

Después de toda la investigación y realizar el diseño se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Se cumplio con el diseño de robot de inspección visual, principalmente se validó en simulaciones el sistema mecánico por parte del equipo de laboratorio y se generaron los planos de detalle para su producción.
- Por la parte electrónica se procede a trabajar en un diseño PCB para su fabricación y poder probar el diseño mecánico en laboratorio. Los componentes electrónicos se seleccionaron en función a los requerimientos.
- A pesar de que existen diferentes diseños de robots de inspección en la literatura ninguno describe el diseño para que el robot pueda operar en una atmósfera explosiva, condición frecuente en tuberías de transporte de hidrocarburos, lo que conllevo a estudiar las normas aplicables. El diseño a detalle de las envolventes antideflagrantes que protegen a los motores, la electrónica y el sistema de visión no se muestran a detalle en este trabajo debido a que se pretende mostrar en una segunda parte del desarrollo, una vez obtenida la certificación de que el equipo puede operar en una atmósfera explosiva. No obstante todas las restricciones de diseño se exponen el la norma IEC 60079.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



- Finalmente a pesar de que un primer prototipo se está diseñando para realizar inspección visual solamente, se pretende que el diseño de la plataforma del robot funcione para poder instrumentar otro tipo de métodos de inspección, tales como flujo magnético o ultrasonido.

Referencias

[5] Roland Palmer Jones and Dr. Phil Hopkins, “Managing ILI Projects to get the results you need”, Penspen Integrity, Richmond-Upon-Thames, UK, 2005.

[6] Inessa L. Yablonskikh, Sarah J Dawson, Raja Venkatanarayanan, “Assessment and analysis of pipeline buckles” PPSA, 2007.

[7] Wolfang Krieg, Karlsruhe (DE); Achim Hugger, Karlsruhe (DE), “Method and Device for Inspecting Pipelines”, United States Patents, Patent No.: US6848313 B2, Date of publication: feb. 1, 2005. [4] M. Beller, NDT Systems & Services AG, Stutensee, Germany “Pipeline Inspection Utilizing Ultrasound Technology: On the issue of resolution”, PPSA 2007.

[8] R. G. Carlos, Diseño mecánico de diablo ultrasonido para la medición de espesores, SOMIM, p. 10, 24 de septiembre, 2010 Monterrey, Nuevo León, México.

[9] M. M. Moghaddam,Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC), ISARC 2005, p. 5, 2005.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 261-277.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Construcción de Biorreactor Seco y Sistema de Medición de Biogás

Martinez Rumbo Nathanel Baruc, Luna Torres Agueda, Pérez Bautista Félix, Valencia Morales Alma Delia y Ixmatlahua Rivera Blanca Olivia

Instituto Tecnológico de Iztapalapa,
Av. Telecomunicaciones S/N, Col. Chinampac de Juárez, C.P. 09208
Iztapalapa, Ciudad de México.
Tel. 5773-8210,
e-mail: informes@itiztapalapa.edu.mx
www.itiztapalapa.edu.mx

Resumen

El problema energético y el impacto ambiental de las concentraciones urbanas exige innovar soluciones para la generación de energía limpia. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un prototipo de biodigestor seco con un sistema de medición de control automático, para la generación de biogás a partir de residuos solidos urbanos biodegradables. El prototipo hace uso de la digestión anaeróbica seca, considerada una tecnología novedosa puesto los sistemas secos aún no han alcanzado un alto grado de desarrollo, principalmente debido a los problemas asociados a la dificultad del manejo y control de las variables del proceso. El sistema de biodigestión consta de dos etapas: la construcción del prototipo de digestor seco y el sistema electrónico para el monitoreo y control del proceso de producción de biogás. El estudio abarca la determinación de los parámetros técnicos para el diseño y construcción de un biodigestor seco, así como el diseño y selección de los componentes mecánicos y electrónicos que permitan el control y manejo eficiente del biodigestor y sus componentes.

Palabras clave: biodigestor, bioreactor, circuitos electrónicos, automatización, bioenergía, sensores

1. Introducción

Como consecuencia de la creciente crisis energética, las políticas gubernamentales de los países desarrollados han adoptado como un elemento clave el desarrollo de fuentes de energía alternativas, que sean sostenibles y cuya generación y aprovechamiento tenga un menor impacto en el ambiente [1]. Esta tendencia ha cobrado mayor interés en los últimos años debido al crecimiento demográfico, que ha resultado en un aumento sostenido en la demanda de energéticos [2]. La solución a este problema es la utilización de fuentes de energía alternativas, las cuales son baratas, renovables y no contaminantes. Entre estas soluciones destaca la Bioenergética [3], llamada así debido a que logra obtener energía a partir de desechos biológicos, resultando en una fuente de energía más barata, renovable y limpia. Este proceso de transformación es posible a través de la digestión anaerobia.

La Digestión Anaerobia (DA) es un proceso biológico que involucra la descomposición de materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno y es adecuada para el tratamiento de Residuos sólidos urbanos biodegradables, residuos comerciales e industriales y el desperdicio de alimentos [4]. La DA es un proceso biológico, complejo y degradativo, en el que algunos materiales orgánicos biodegradables son convertidos en energía renovable (biogás) y biofertilizantes. Esta bioconversión es llevada a cabo por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente



inhibidas por el oxígeno. En un proceso de DA, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, mientras que, en un sistema aeróbico, el crecimiento bacteriano consume hasta un 50% de la energía disponible [5].

Existen diferentes tecnologías para llevar a cabo la digestión anaeróbica, sin embargo la principal distinción entre estas tecnologías se puede lograr considerando la concentración de sólidos totales (ST) usados en el proceso de biodigestión, siendo clasificados en Sistemas de Digestión Anaeróbica Húmeda (DAH) y Sistemas de Digestión Anaeróbica Seca (DAS). En procesos DA húmedos, la materia prima se suspende en una concentración de materia sólida menor al 15 % ST y en procesos de DA secos, la concentración de materia sólida es mayor al 20% ST [6].

En los sistemas convencionales (usualmente DAH) para lograr una correcta bioconversión, es necesario diluir la materia orgánica de manera que facilite el transporte de nutrientes para lograr una producción de gas constante [7]; la mezcla de esta agua y los microorganismos se llama lixiviado. En consecuencia, esto no solo aumentará el consumo de energía para el calentamiento del digestor y el bombeo de lodos de alimentación, sino también el volumen del efluente del digestor [8]. Es decir, esta dilución resulta en un aumento significativo en el volumen del biorreactor [9]. Los grandes volúmenes que requieren los biodigestores húmedos han hecho que la aplicación de estas tecnologías se limite a las zonas rurales, en donde la cantidad de biomasa es abundante y las extensiones de terreno permiten albergar estos enormes sistemas. Por esta misma razón, la aplicación de estos sistemas no ha encontrado cabida en las zonas urbanas, en donde los espacios son reducidos, y donde, paradójicamente, se consume una mayor cantidad de energía. Para superar estos inconvenientes, se puede utilizar la digestión seca o " digestión con alto contenido de sólidos " en donde la biomasa sea digerida sin diluir [10].

La parte medular del proceso de digestión o el corazón de la misma, es el Biorreactor. En el cual se depositan los materiales orgánicos (biomasa), tales como excretas animales y desechos vegetales, que se convierte en el producto deseado [11]. El biorreactor consiste en un contenedor cerrado, hermético e impermeable llamado biodigestor [12]. La maximización de la tasa de formación y rendimiento del producto dentro del biorreactor es una parte clave de la optimización del proceso de producción [11].

Sin embargo, a diferencia de los biodigestores que utilizan tecnología de DA húmeda, los sistemas secos aún no han alcanzado un alto grado de desarrollo, principalmente debido a los problemas asociados a la dificultad del manejo y control de materiales, las características de la mezcla, las capas sólidas y la transferencia de calor [11]. Si bien, existen estudios y modelos de biorreactores secos, estos son limitados.

En este artículo se hace énfasis en la determinación de los parámetros técnicos para el diseño y construcción de un biodigestor seco para optimizar los procesos de mezclado y transferencia de masas, así como el diseño y selección de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que permitan el control y manejo eficiente del biodigestor y sus componentes.

2. Material y Métodos

2.1 Bioenergía

Dentro de la clasificación de energías renovables convencionales se encuentra la biomasa. El término Biomasa se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico. El concepto de biomasa comprende a productos tanto de origen vegetal como animal. Además, al referirse a la “bioenergía” o “energía de masas” según Bridgewater [13], es la energía obtenida mediante la combustión de materiales derivados de fuentes biológicas, es decir la bioenergía es la energía generada de recursos biológicos renovables. El término Biomasa incluye también todos los desperdicios generados por nuestra sociedad, como por ejemplo los residuos

ISBN: 978-607-9394-14-1.



industriales de la fabricación de alimentos y bebidas, el estiércol humano y animal, y los residuos domésticos.

El uso de la biomasa como combustible tiene beneficios significativos como: mitigar el efecto del cambio climático; reducir la lluvia ácida, la erosión del suelo, la contaminación del agua; reducir las cantidades de desechos en rellenos sanitarios y botaderos de basura; mejorar el ambiente y el hábitat natural; y, en general, mejorar las condiciones del suelo para cultivos y bosques. Además de los beneficios ambientales, la biomasa trae consigo otros beneficios de carácter económico y social, como la diversificación del uso del suelo, ampliación de las zonas agrícolas, creando así empleos directos e indirectos, y la reducción del uso de combustibles fósiles.

2.2 Biodigestión

Este proceso de obtención de energía a partir de desechos biológicos, es posible a través de la digestión anaerobia del material orgánico, lo que permite su descomposición liberando biogás [12], cuyo principal elemento es gas metano [14]. Siendo que el metano es 84 veces más contaminante que el dióxido de carbono (CO_2) y su efecto en el calentamiento global es mayor debido a que atrapa 20 veces más el calor [15] el aprovechamiento del biogás no solo resulta en energía limpia de bajo costo, sino también en el mejoramiento de la calidad del aire en las ciudades.

Esta descomposición ocurre en ausencia de oxígeno (sin aire) al interior de un biodigestor, medio que facilita el crecimiento y la proliferación de un grupo de bacterias anaerobias metanogénicas, que descomponen y tratan los residuos dejando como resultado final un gas combustible conocido como biogás, además produce un efluente líquido alcalino rico en nutrientes y materia orgánica estabilizada.

2.3 Biorreactores

El biorreactor es la parte clave en un proceso de biodigestión donde la materia prima, en las condiciones adecuadas se convierte en el producto deseado, biogás. Maximizar la tasa de la formación de microorganismos y el rendimiento del producto dentro del biorreactor es fundamental para optimizar el proceso de producción. Una forma de clasificar los tipos de biorreactores es por la tecnología que emplean, es decir el tipo de digestión que llevan a cabo en su interior; por lo que podrían ser clasificados como Sistemas de Digestión Anaerobica Humeda y Sistemas de Digestión Anaerobica Seca [6].

Cada uno de estos sistemas tiene sus propios beneficios y limitaciones particulares. Los digestores húmedos son la principal tecnología adoptada y mayormente difundida para el tratamiento de residuos biodegradables [16] por la facilidad de la implementación y control. En estos sistemas, solo se encuentra una dificultad importante: la transferencia de oxígeno a los microorganismos que depende de la forma, el tamaño del reactor y el sistema de agitación / aireación utilizado [2].

En contraste los digestores secos presentan una reducción en el volumen del reactor, resultado de que la biomasa sea digerida sin diluir y a una mayor carga volumétrica. Sin embargo, esta tecnología trae consigo algunos problemas asociados a los biodigestores secos entre los que destaca el lograr una correcta circulación de nutrientes y microorganismos. Debido a que el porcentaje de sólidos es muy elevado, es difícil que, por la diferencia de densidades, la materia orgánica digerida de paso a la materia orgánica fresca para alcanzar a los microorganismos digestores.

Los Sistemas de Digestión Anaeróbica Seca se consideran una tecnología más robusta y flexible que además de requerir menos espacio por la reducción del volumen que puede ofrecer ventajas potenciales sobre los Sistemas húmedos, incluida una mayor flexibilidad en el tipo de materia prima aceptada, tiempos de retención más cortos, uso de agua reducido y una administración más flexible, y oportunidades de comercialización, del producto final [16]. Dada la potencial aplicación de los biorreactores secos en el entorno urbano, esta tecnología es la que se aborda en el estudio.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sin embargo a diferencia de los Sistemas basados en digestión húmeda, de los cuales abundan estudios; en los sistemas Secos no existe aún un diseño de biorreactor suficientemente desarrollando para atender problemas relacionados con el manejo y control de las características de mezcla y transferencia de calor, de hecho, la limitación de la disipación de calor es uno de los mayores inconvenientes de la DA seca en comparación con la convencional, donde el agua es el principal factor a controlar y un buen mezclado proporciona una dispersión eficaz del oxígeno y también sirve para proporcionar un mejor control de la temperatura. En los sistemas secos en las etapas iniciales las concentraciones de temperatura y oxígeno son las mismas. A medida que el proceso de biodigestión avanza, el oxígeno se difunde y se somete a biorreacciones, liberando calor, que no se disipa fácilmente debido a la mala conductividad térmica del sustrato. Así también, se produce la contracción del lecho del sustrato y la porosidad también disminuye, dificultando aún más la transferencia de calor. El control de la temperatura del sustrato es muy crítica en los sistemas secos. Los diferentes diseños de biorreactor utilizados han mostrado diferentes desventajas, por lo que se tiene la necesidad de desarrollar un nuevo biorreactor o modificar los diseños ya existentes. Este tipo de tecnología a despertado interés de investigadores e industriales en los últimos años, no obstante la mayoría de los estudios se centra en el impacto de los diferentes factores involucrados en el proceso de biodigestión y no tanto en aspectos del diseño de ingeniería.

Los digestores secos son un tipo de digestores que operan a base desechos que se pueden considerar apilables, es decir, con contenido de sólidos mayor al 20%. La biomasa con estas características generalmente proviene de desechos de comida, y se fermentan por lotes en cámaras selladas con un sistema en lazo cerrado de percolación. La percolación es colectada en la base del reactor y posteriormente rociada como parte de un proceso de recirculación automático.

Dentro de los biorreactores de DA seca existen dos categorías: a) a escala de laboratorio, usando cantidades pequeñas de materia orgánica que van desde gramos hasta algunos kilogramos, b) a escala piloto y industrial, donde se usan de kilogramos hasta varias toneladas de materia orgánica. Para objeto del estudio se estudian solamente los reactores a escala.

Los distintos tipos de reactores ocupados para la DA seca se pueden agrupar en 4 tipos de reactores, donde cada uno trata de generar condiciones más favorables para el proceso. Esta clasificación, se hace en base al tipo de aireado o sistemas de circulación empleados [5]:

a. De bandeja: Consiste en bandejas planas, donde el sustrato es distribuido en cada bandeja formando una capa delgada de solo unos centímetros de profundidad. El reactor es contenido en una cámara a temperatura constante en donde aire humidificado es recirculado. La principal desventaja de esta configuración es que utiliza numerosas bandejas y requiere un gran volumen para la correcta circulación de la materia.

b. Camas empacadas: Está usualmente compuesta de una Columna de vidrio o plástico con un sustrato sólido retenido en la base. A través de la cama del sustrato aire humidificado es forzado a circular. Las principales desventajas de esta configuración es la dificultad al obtener el producto, crecimiento no uniforme, problemas de remoción de calor y problemas de escalabilidad.

c. Tambor horizontal: Este diseño permite adecuar la aireación y la mezcla del sustrato. Se requiere que este tipo de reactor se mezcle continuamente para aumentar el contacto entre la pared del reactor y el medio sólido y también para proporcionar oxígeno al microorganismo. La mezcla se realiza girando todo el recipiente o mediante diversos dispositivos de agitación, como paletas y deflectores. La principal desventaja es que el envase solo es llenado a su 30% de capacidad y es difícil regular la temperatura del medio sólido.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

3.1 *Construcción de prototipo de Bioreactor seco*

El desarrollo del proyecto de investigación consto de dos grandes fases: a) la construcción 13 biorreactores de tipo continuo y discontinuo y b) la construcción del sistema de medición del producto generado en el proceso de DA seco.

Para la primera etapa se construyeron nueve reactores secos discontinuos de tipo cilíndrico con una capacidad 10 litros, con una válvula de salida para extraer el gas generado. Estos digestores servirán para generar el inóculo así como para análisis de distintos tipos de biomasa, pero su funcionamiento se asemeja a los biodigestores convencionales. Por otro lado la propuesta de biorreactor del equipo investigador se centra en un biorreactor de tipo continuo, de los cuales se construyeron cuatro prototipos con diferente volumen. La Figura 1 y 2 muestran el biorreactor propuesto. El diseño de los 4 digestores solo varía por las medidas, respetando la estructura propuesta. En la figura 2 se observa la estructura del biodigestor seco anaerobico el cual emula el tracto digestivo humano. El cuerpo del biodigestor consiste en una tubería compuesta por tramos de 60cm con codos de 45º para formar una serpentina capaz de contener de 10 a 15 litros de biomasa dependiendo el diámetro de la estructura del biodigestor. Uno de estos prototipos se construyó con tubería de 3 pulgadas capaz de soportar 15 litros de biomasa y contiene un tambo hermético para el deposito del biocombustible; los otros tres prototipos fueron hechos con una tubería de 1.5 pulgadas los cuales pueden soportar 10 litros de biomasa en la tubería, cada uno con un tambo hermético para el deposito del biocombustible. Esta estructura permitirá circular a la biomasa por secciones alternadas de flujo laminar y secciones de flujo turbulento. Los tramos tubulares serán las secciones de flujo laminar, mientras que los retornos (codos) que unen estos tramos, serán las secciones de turbulencia, la cual ayudará a optimizar los procesos de mezclado y transferencia de masas, para que la biomasa se pueda deslizar dentro del biodigestor sin necesidad de agua como en otros sistemas. También aquí se incluyeron 3 sensores de temperatura sumergibles los cuales nos registraran la temperatura de la biomasa, ya que es un factor clave para la generación de biogás, el cual se podrá monitorear y detectar fallas en el proceso.

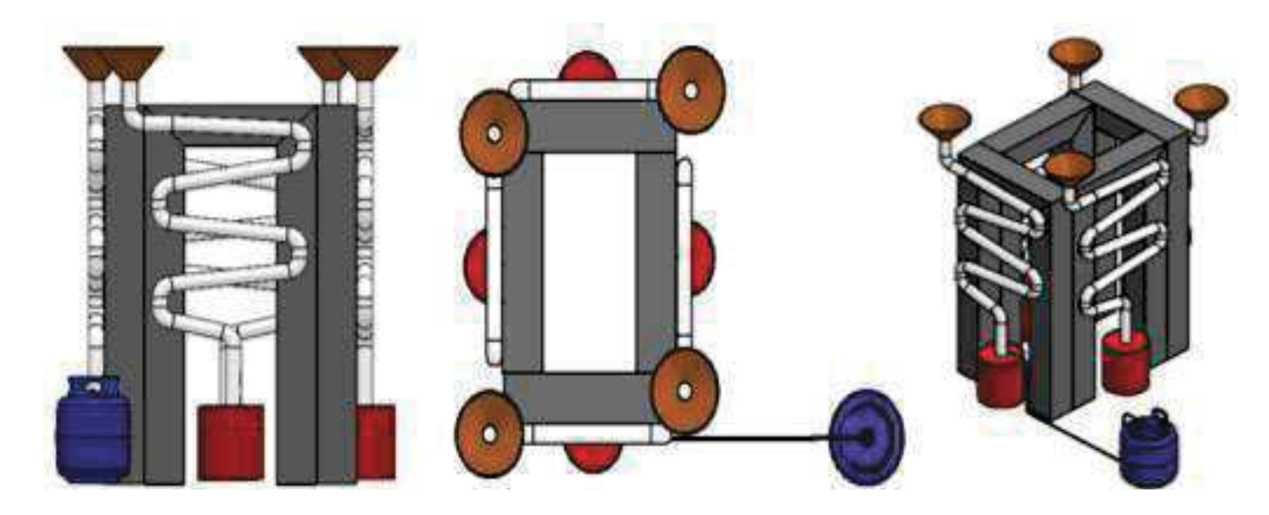


Figura 1. Vista frontal, superior e isometrico en Solid Works de los 4 prototipos de biorreactor seco

La estructura cuenta con un cono alimentador, que sirve para deslizar la biomasa dentro del biodigestor, además de válvulas de entrada y salida de biomasa y biocombustible-biogás, respectivamente. Estas válvulas permitirán sellar el sistema para garantizar las condiciones del proceso, la primera para evitar la entrada de aire al sistema y la segunda válvula para dejar pasar el biogás al tambo hermético. En el tambo hermético donde se almacena el biocombustible y el biogás, resultados del proceso de digestión anaerobia, cuenta con una salida a través de un tubo de cobre para que el biogás pueda salir y almacenarse en su destino final. En esta sección se coloco el sensor

ISBN: 978-607-9394-14-1.



MQ4, el cual nos permite detectar el biogás adquirido y poder medirlo. El biogás será almacenado en un tanque de gas con ayuda de un compresor. Finalmente, los cuatro biorreactores se sostienen en una estructura de PTR capaz de soportar el peso de estos con biomasa.

Para la transferencia del biogás al depósito, se utilizó un compresor para comprimir el gas generado de biodigestor. El cual evita las fugas o retornos del biogás en el momento de abrir las válvulas para alimentar el biodigestor. Las Figuras 3, 4, 5 y 6 muestran el funcionamiento del sistema de compresión. En la Figura 3 se muestra el circuito Neumático de la Instalación de Gas, completamente desactivado, en el circuito de la Figura 4 se muestra la tubería sin el paso del flujo de gas, hacia el compresor sin necesidad de activar la válvula de salida. En el circuito de la Figura 5 se muestra el paso del flujo de gas, por el paso de la tubería de Gas al compresor, sin activar la válvula de salida al tanque de Almacenamiento. Finalmente en el circuito de la Figura 6 se muestra, la salida del gas Comprimido y la activación de la válvula de salida del compresor para recolectar al Tanque de Almacenamiento.

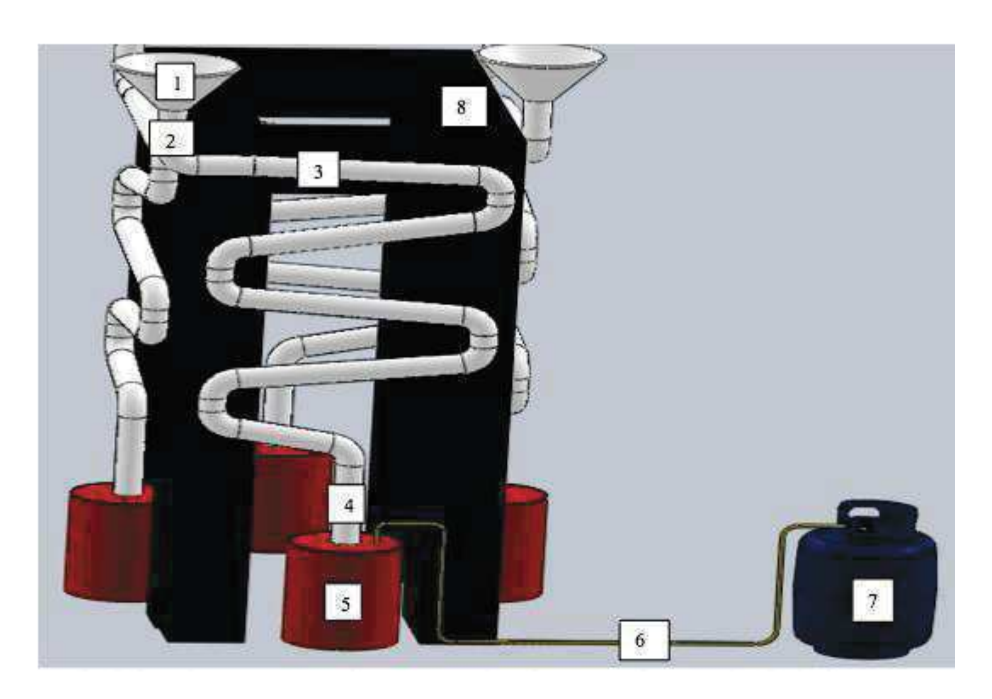


Figura 2. Estructura del biodigestor 1) Cono alimentador, 2) Válvula de seguridad, 3)Deposito del digestor, 4)Valvula de salida de biocombustible y biogas, 5) Deposito de biogas y biocombustible, 6) Tubería de paso de biogas, 7) Tubería de paso de biogas y 8) estructura de soporte de biodigestores

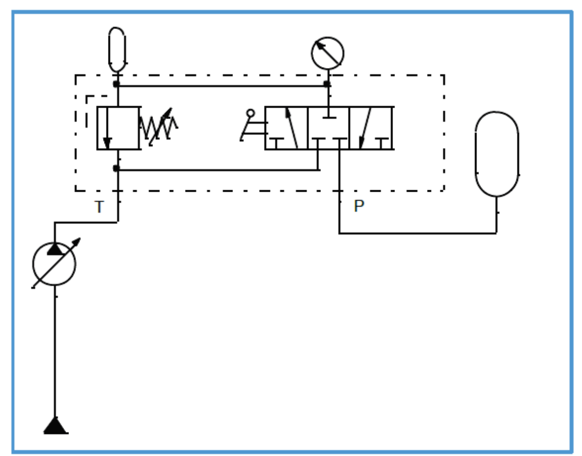


Figura 3.- Circuito Neumático de la Instalación de Gas, completamente desactivado



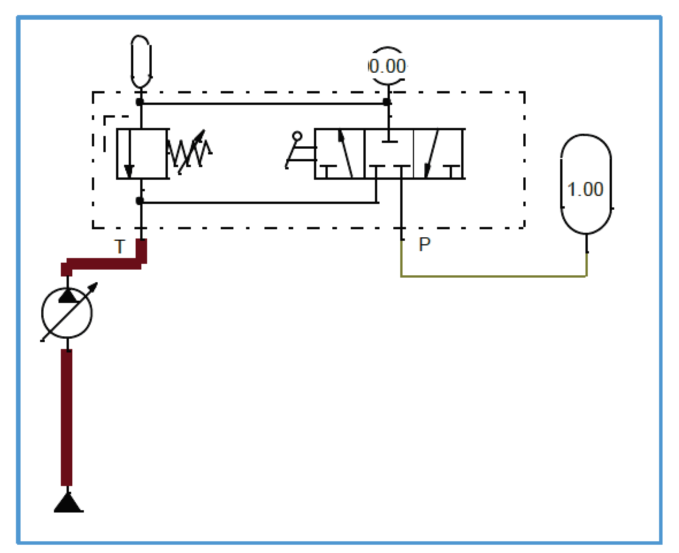


Figura 4.- Tubería del compresor

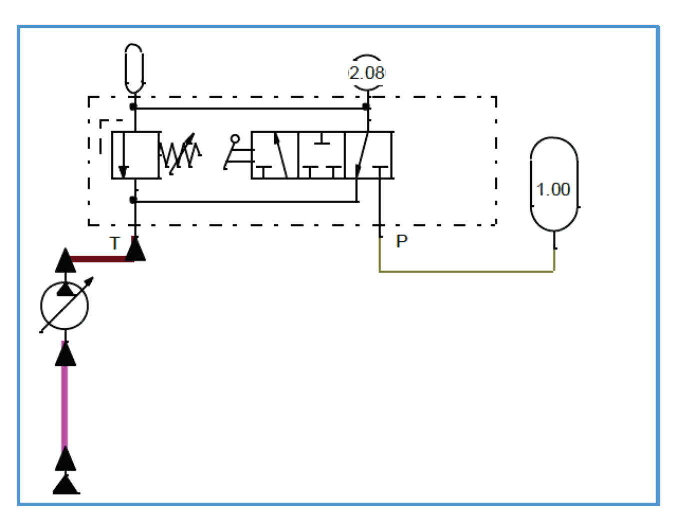


Figura 5.- Válvula de salida

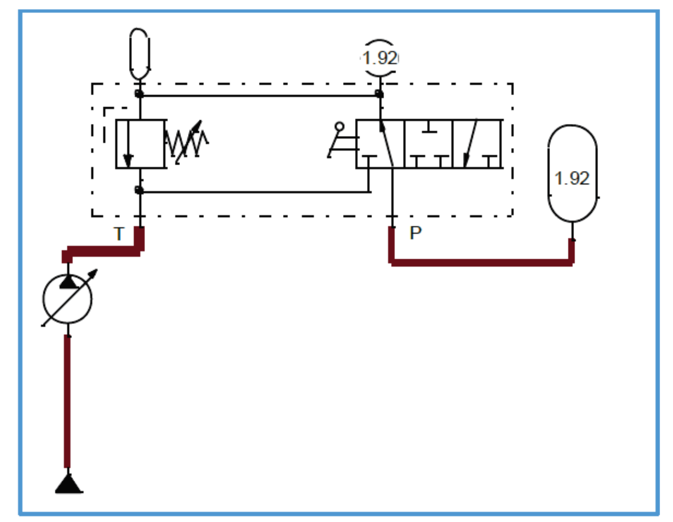


Figura 6.- Salida de gas comprimido

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.2 Sistema de control y medición

El sistema de control y medición del digestor se construyo con la ayuda de sensores. El sensor MQ4 es un sensor para la detección de Gas Metano en el aire, el cual puede detectar concentraciones desde las 200 hasta las 10000 ppm. Este sensor tiene una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido. La salida del sensor tiene una resistencia analógica. Se utiliza en la detección de fugas de equipos de gas en los mercados de consumo y la industria. Se eligió este sensor por su alta sensibilidad al gas y por un tiempo de respuesta rápido. También por sus características de condiciones de trabajo, el sensor resiste temperaturas entre -10°C a 65°C. Este sensor tiene un amplio rango de detección, funcionamiento estable, larga vida y bajo costo. La Figura 7 muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del sensor para el proyecto.

Figura 7.- Diagrama de flujo sensor MQ4.

Al iniciar el programa se va a establecer, la lectura de entrada analógica de los 13 sensores MQ4. La lectura de nuestro valor en voltaje se va a convertir, con la Operación (5.0/1023.0), para

ISBN: 978-607-9394-14-1.



obtener un Voltaje más estable se hará una resta del Valor del voltaje menos 0.09 (variación). A continuación, para obtener los PPM se va a multiplicar 10,000 por el Voltaje entre 5. Las figuras 8 y 9 muestran la programación realizada para la medición del biogás. En donde setup() es la parte encargada de recoger la configuración. Serial begin define la velocidad de transferencia a 9600 bps (baudios), loop() es la que contienen el programa que se ejecutará cíclicamente (de ahí el termino loop –bucle-). Ambas funciones son necesarias para que el programa trabaje. Int adc lee los sensores MQ4 conectados a las entradas analógicas del Arduino, por su lado float es visible solo dentro del bucle, solo se puede ver dentro del programa, esto no se imprime en pantalla. *//Convertir la lectura en un valor de voltaje para poder convertirlo en ppm y que sea más fácil la lectura de la producción de biogás.* // Resta el voltaje de la primera lectura para obtener una lectura estable y así tener una lectura del producto obtenido más estable. // Operación para la obtención de ppm (*partes por millón*).

```
  Serial.begin (9600);
}
Void loop () {
  int adc_MQ0 = analogRead (A0); //Lee la salida analógica del sensor (1).
  int adc_MQ1 = analogRead (A1); Sensor (2)
  int adc_MQ2 = analogRead(A2); Sensor (3)
  int adc_MQ3 = analogRead(A3); Sensor (4)
  int adc_MQ4 = analogRead(A4); Sensor (5)
  int adc_MQ5 = analogRead(A5); Sensor (6)
  int adc_MQ6 = analogRead(A6); Sensor (7)
  int adc_MQ7 = analogRead(A7); Sensor (8)
  int adc_MQ8 = analogRead(A8); Sensor (9)
  int adc_MQ9 = analogRead(A9); Sensor (10)
  int adc_MQ10 = analogRead(A10); Sensor (11)
  int adc_MQ11 = analogRead(A11); Sensor (12)
  int adc_MQ12 = analogRead(A12); Sensor (13)
  float voltaje0 = adc_MQ0 * (5.0 / 1023.0); //Convertir la lectura en un valor de voltaje.
  float voltaje1 = adc_MQ1 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje2 = adc_MQ2 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje3 = adc_MQ3 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje4 = adc_MQ4 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje5 = adc_MQ5 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje6 = adc_MQ6 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje7 = adc_MQ7 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje8 = adc_MQ8 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje9 = adc_MQ9 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje10 = adc_MQ10 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje11 = adc_MQ11 * (5.0 / 1023.0);
  float voltaje12 = adc_MQ12 * (5.0 / 1023.0);
  float voltajebien0=voltaje0-0.09; // Resta de Voltajes para obtener una lectura estable.
  float voltajebien1=voltaje1-0.09;
  float voltajebien2=voltaje2-0.09;
  float voltajebien3=voltaje3-0.09;
  float voltajebien4=voltaje4-0.09;
  float voltajebien5=voltaje5-0.09;
  float voltajebien6=voltaje6-0.09;
  float voltajebien7=voltaje7-0.09;
  float voltajebien8=voltaje8-0.09;
  float voltajebien9=voltaje9-0.09;
  float voltajebien10=voltaje10-0.09;
  float voltajebien11=voltaje11-0.09;
  float voltajebien12=voltaje12-0.09;
  float ppm0=(10000*voltajebien0/5);// Operación para la obtención de ppm(partes por millón).
  float ppm1=(10000*voltajebien1/5);
  float ppm2=(10000*voltajebien2/5);
  float ppm3=(10000*voltajebien3/5);
  float ppm4=(10000*voltajebien4/5);
  float ppm5=(10000*voltajebien5/5);
  float ppm6=(10000*voltajebien6/5);
  float ppm7=(10000*voltajebien7/5);
  float ppm8=(10000*voltajebien8/5);
  float ppm9=(10000*voltajebien9/5);
  float ppm10=(10000*voltajebien10/5);
  float ppm11=(10000*voltajebien11/5);
  float ppm12=(10000*voltajebien12/5);
```

Figura 8.- Programación en Arduino de sensor MQ4

Serial print imprime los datos en el puerto serie, seguido por un retorno de carro automático y salto de línea. Este comando toma la misma forma que Serial.print (), // data time: Comando para

ISBN: 978-607-9394-14-1.



mandar resultado a Excel se mandará la lectura en ppm de cada sensor a una hoja de Excel con hora y fecha.

```
Serial.print("DATA,TIME");// Comando para mandar resultado a Excel.
Serial.print("    ppm0:");
Serial.println(ppm0);
Serial.println();
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("    ppm1:");
Serial.println(ppm1);
Serial.println();
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("    ppm2:");
Serial.println(ppm2);
Serial.println();
.    .    .
.    .    .
.    .    .
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("    ppm12:");
Serial.println(ppm12);
Serial.println();
Serial.println();
delay(10000);// Tiempo del ciclo
} // Se cierra el Programa
```

Figura 9.- Secuencia para exportar resultados a Excel

Se utilizó el sensor “DS18B20” (temperatura), el cual se eligió por su alta precisión de +-0.5 grados, también por que se podía conectar en serie y aun solo pin de Arduino sin necesidad de ocupar un pin por sensor ya que nos da la facilidad de sacarla dirección Mac de cada sensor, de igual forma por su amplio rango de operación que es de -50 a 125 ºC, bajo costo y por ser sumergible. El sensor permite medir temperaturas de hasta 125ºC de forma fácil y además está sellado en un envoltorio que permite sumergirlo en un líquido o protegerlo de la intemperie. Dado que es un sensor digital, la señal leída no se degrada debido a la distancia del cableado. Puede funcionar en modo 1-Wire con una precisión de ±0.5°C con una resolución de 12 bits. También pueden utilizarse varios sensores sobre el mismo pin ya que internamente viene programado con un ID único de 64 bits para diferenciarlos. El rango de funcionamiento es de 3 a 5 V por lo que se puede utilizar en prácticamente cualquier sistema de que use microcontroladores. La figura 10 muestra el diagrama de funcionamiento del sensor para este proyecto.

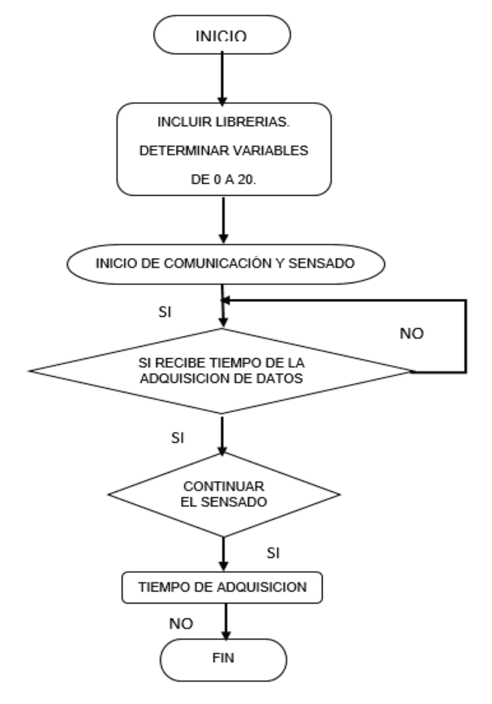


Figura 10.- Flujo sensores temperatura.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El programa elaborado para el sensor de temperatura DS18B20 se muestra en la Figura 11, la misma programación fue utilizada para los 21 sensores (en la figura solo se observa la programación del primer sensor). Al iniciar el programa se van a agregar las librerías para conectar el bus que son (1-Wire y Dallas Temperature). Se conecta a un solo PIN, para que la librería Dallas Temperature, detecte la temperatura de cada uno de los 21 sensores.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// Pin donde se conecta el bus 1-Wire
3ons tint pinDatosDQ = 5;
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);//Instancia a OneWire
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);// Instancia a DallasTemperature
void setup() {// Iniciamos la comunicación serie
Serial.begin(9600); // Iniciamos el bus 1-Wire
sensorDS18B20.begin();
}
void loop() {// Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores
Serial.println("Mandando comandos a los sensores");
sensorDS18B20.requestTemperatures();// Lee y  muestra los datos de los sensores DS18B20
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 0: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));
Serial.println(" C");
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 1: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(1));
Serial.println(" C");
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 2: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(2));
Serial.println(" C");
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 3: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(3));
Serial.println(" C");
.    .    .
.    .    .
.    .    .
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 19: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(19));
Serial.println(" C");
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temperatura sensor 20: ");
Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(20));
Serial.println(" C");
delay(10000); // Tiempo del Ciclo
}// Se cierra el Programa.
```

Figura 11.- Programación del sensor DS18B20.

Se incluyeron dos librerías para el funcionamiento correcto de los 21 sensores. Finalmente Serial print Imprime los datos en el puerto serie, seguido por un retorno de carro automático y salto de línea. Este comando toma la misma forma que Serial.print (), // data time:Comando para mandar resultado a Excel se mandara la lectura en ppm de cada sensor a una hoja de Excel con hora y fecha. Y Delay(1000)cierra el programa.

Por último se instalaron sensores DTH11 (Temperatura ambiente), cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 12, está constituido por dos sensores resistivos (NTC y humedad). Tiene una excelente calidad y una respuesta rápida en las medidas. Puede medir la humedad entre el rango 20% aprox. 95% y la temperatura entre el rango 0°C a 50°C. Cada sensor está estrictamente calibrado, presentando una extrema precisión en la calibración. Los coeficientes de calibración se almacenan como programas en la memoria OTP, que son empleados por el proceso de detección de señal interna del sensor.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



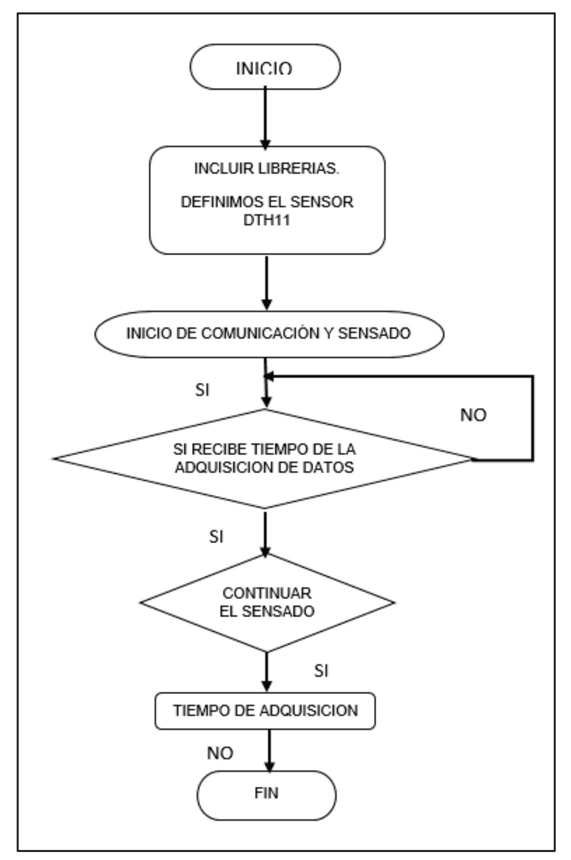


Figura 12. Flujo sensor DTH11.

Al iniciar el programa (Figura 13) se va a declarar la librería para el sensor DTH11, y se declaran los pines que se ocuparan. Para después se hace la lectura y se manda a imprimir la temperatura.

Añadimos la librería "DH.th" con la cual trabaja nuestro sensor, con esta librería nuestro sensor trabajara sin problema alguno. Con DHTPIN 13 indicamos el pin donde conectaremos la data de nuestro sensor, definimos sensor DHT 11 que es el sensor que trabajaremos, posteriromente definimos el pin con el que habrá de trabajarse, int Temp=22, es el parámetro de encendido de ventilador. Este valor indica la temperatura que se encederá el calentador. En donde setup() es la parte encargada de recoger la configuración. Serial begin define la velocidad de transferencia a 9600 bps (baudios)de cada uno de nuestros sensores. La lectura de la temperatura llevada sobre 250 milisegundos. La lectura del sensor también puede estar sobre los 2 segundos (es un sensor muy lento). El programa guarda la lectura de la temperatura en la variable float "t". Para sacar la temperatura promedio se hace la operación correspondiente la cual solo aparece en el programa y no en la impresión de pantalla. También se declara el pin que trabajara con un banco de relevadores para poder activar nuestros calentadores y así poder tener la temperatura adecuada para la biomasa dentro de nuestro biorreactor. Se incluye la condicionante if para activar los calentadores si nuestra temperatura es menor o mayor mandará a activar o desactivar los calentadores dependiendo cual sea la situación de la temperatura. Finalmente se mostrará el mensaje con valores actuales de temperatura, así como máximos y mínimos de cada uno de ellos y con Serial print, se Imprime los datos en el puerto serie, seguido por un retorno de carro automático y salto de línea. Este comando toma la misma forma que Serial.print (), data time:Comando para mandar resultado a Excel se mandará la lectura en ppm de cada sensor a una hoja de Excel con hora y fecha. Se imprimirá la temperatura Promedio.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 22, pp. 261-277.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
#include "DHT.h"
#include <Wire.h>
//#define DHTPIN 13
#define HT1 12
#define HT2 13
#define HT3 11
#define HT4 10
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht1 (HT1, DHTTYPE);
DHT dht2 (HT2, DHTTYPE);
DHT dht3 (HT3, DHTTYPE);
DHT dht4 (HT4, DHTTYPE);
int Temp=22;
void setup()
{
Serial.begin(9600);
dht1.begin();  //Iniciamos el sensor
dht2.begin();
dht3.begin();
dht4.begin();
pinMode(8,OUTPUT);
}
void loop()
{
 float t1, t2, t3, t4 = 0;
 t1 = dht1.readTemperature();
t2 = dht2.readTemperature();
t3 = dht3.readTemperature();
t4 = dht4.readTemperature();
float temperaturapromedio=((t1+t2+t3+t4)/4);
if (temperaturapromedio <=Temp){
digitalWrite(8,HIGH);
}
if(temperaturapromedio >Temp){
digitalWrite(8,LOW);
}
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temp 1: ");
Serial.println(t1);
Serial.println();
delay(3000);
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temp 2: ");
Serial.println(t2);
Serial.println();
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temp 3: ");
Serial.println(t3);
Serial.println();
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("Temp 4: ");
Serial.println(t4);
Serial.println();
Serial.println();
Serial.print("DATA,TIME");
Serial.print("temperaturapromedio:");;
Serial.println(temperaturapromedio);
Serial.println();
delay(3000);
}
```

Figura 13. Programación de sensor DTH11.

Por ultimo, las figuras 14, 15 y 16 muestran los diagramas de conexión del proyecto. En el esquema de la Figura 14, se puede observar la conexión eléctrica de los 4 sensores *DTH1*, estos permiten detectar la temperatura a la que estan sometidos los biorreactores y ayudan a empatar los diferentes voltajes, tanto el de la placa como el de los calentadores. Esto sucede debido a que arduino manda un pulso al banco de relevadores el cual tiene un optocoplador que recibe la señal, activa el RELAY y deja activar los calentadores.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 14.- Conexión de sensores DTH11, A) conexión electrica de los 4 sensores, B) placa de arduino, C) Banco de relevadores Y D) calentadores de aceite.

La Figura 15 muestra la conexión eléctrica de los 21 sensores de temperatura y la placa de arduino. En este caso todos los sensores pueder ir conectados a un solo pin ya que por características del sensor nos permite hacer esto con ayuda de arduino. La Figura 16 muestra conexión eléctrica de los 13 sensores de gas MQ4 a las entradas de arduino con conexión compartida de energía y voltaje para no afectar la variación y tener una pérdida de voltaje por demanda de voltaje

ISBN: 978-607-9394-14-1.



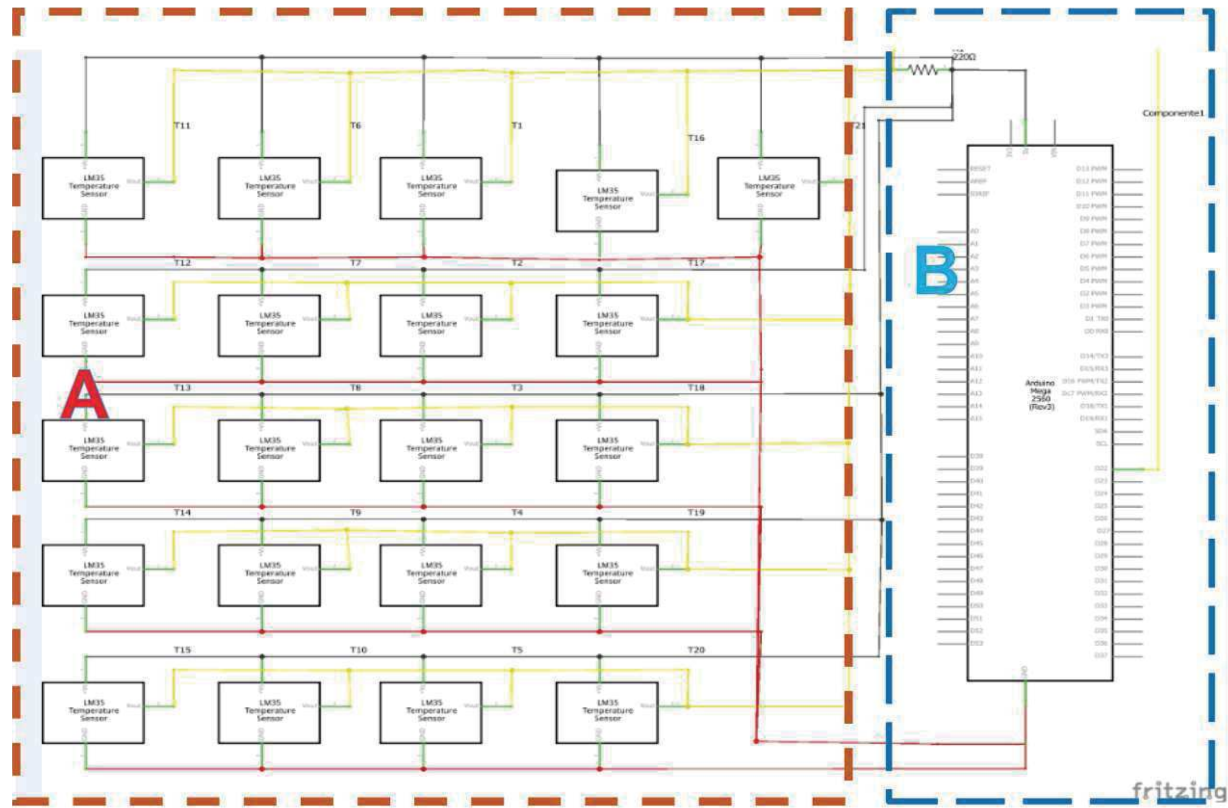


Figura 15.- Conexión de sensores de temperatura, A) Conexión electrica de los 21 sensores y B) Placa de arduino.

Con el sistema de control obtenido se evaluará continuamente un fallo o problema a través de la información obtenida por los sensores que miden temperatura y presencia de gas metano y que será traducida en parámetros conocidos a las computadoras y de esta forma poder realizar una corrección, en caso de ser necesario, para estabilizar la producción. Finalmente se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento del sistema de control automático implementado y se determino que es funcional para gestionar el sistema de biodigestión diseñado, y se espera que a través de su aplicación los resultados sean eficientes en el proceso de generación del biogás y lograr la producción deseada en óptimas condiciones.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 16.- Conexión de sensores de gas, A) Conexión electrica de los 13 sensores MQ4 y B) Placa de arduino.

4. Conclusiones

La construcción de este prototipo de biodigestor seco representa parte de los esfuerzos de instituciones académicas para generar alternativas energéticas, económicas y ecológicas para atacar la problemática ambiental del país. Si bien el tipo de tecnología propuesta no esta ampliamente difundida en México, principalmente por las dificultades del control de las variables, existen avances variados en el diseño de estos equipos y potenciales ventajas en sus procesos que las convierten en otras alternativas tecnológicas para el manejo de residuos solidos urbanos biodegradables, países como Asia, Reino Unido y Alemania cuentan cuentan con mayores estudios relacionados.

En esta investigación se diseñó y construyó un prototipo de biodigestor con sistema de control automático para la generación de biogás a partir de materia orgánica, el diseño responde a las necesidades de un entorno urbano y a los requisitos propios de un sistema de medición. A través del uso de la automatización se pretende controlar las variables críticas para llevar un proceso controlado en la producción del biogás, a través de la utilización de dispositivos electrónicos, sensores y

ISBN: 978-607-9394-14-1.



actuadores. Si bien el alcance de este artículo solo cubre el diseño del bioreactor, este establece las condiciones idóneas para la siguiente fase del proyecto que consiste en comprobar la rentabilidad del sistema y optimizar el rendimiento en la producción del biogás.

Referencias

[1] González F., “Green Solutions 2014: Opportunities for Green Investment in Mexico”, ProMéxico, XI, 16-19, 2014.

[2] Duran A. “Bioreactor designs for solid state fermentation”, Biochemical Engineering Journal 13, 113–125, 2003

[3] Nogués S., ”Energía de la biomasa II (Energías renovables), Prensas Universitarias de Zaragoza, 1ª Edición, España, 2010

[4] Appels, L., Lauwers, J., Degre` ve, J., Helsen, L., Lievens, B.,Willems, K., Van Impe, J., Dewil, R., “Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 9, 4295-4301, 2011

[5] Rodriguez C. S, Sanroma A, “Application of solid-state fermentation to food industry- A review” ,Journal of Food Engineering, 76 , 291–302, 2006.

[6] Angelonidi E., Smith S.., “A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste.“,Water and Environment Journal, 29, 549–557, 2015.

[7] Guevara A. “Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbios rurales.” Editorial CEPIS, Perú, 1ª Edición, 1996

[8] Dong-Hoon K. , Sae-Eun O, “Continuous high-solids anaerobic co-digestion of organic solid wastes under mesophilic conditions”, Waste Management, 31, 1943–1948, 2011

[9] Martí J., “Biodigestores familiares. Guía, Diseño y Manual de Instalación.”, GTZ, Bolivia, 1ª Edición, 2008

[10] Bolzonella, D., Innocenti, L., Pavan, P., Traverso, P., Cecchi, F., “Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase.” Bioresour. Technol. 86, 123–129, 2003

[11] Raghavarao K., Ranganathan T., Karanth N. “Some engineering aspects of solid-state fermentation”, Biochemical Engineering Journal ,13, 127–135, 2003

[12] Huerga, I., Butti M., Venturelli L., . “Biodigestores de pequeña escala, un análisis práctico sobre su factilidad”., Instituto Nacional de Ingeniería Agropecuaria, Argentina, 1ª Edición, 2014

[13] Bridgewater, G. , “Energías alternativas - Handbook. Editorial Parainfo. 1ª Edición, España, 2009

[14] Ministerio de Energía de Chile. “Manual de Biogas”, Proyecto CHI/00/G32, 1ª Edición, Chile, 2011

[15] Bernache, G. “Cuando la basura nos alcance: el impacto de la degradación ambiental .CIESAS, 1ª Edición, México, 2006

[16] Radwan, A.M., Sebak, H.A., Mitry, N.R., El-Zanati, E.A., Hamad, M.A., “Dry anaerobic fermentation of agricultural residues”, Biomass and Bioenergy, Volume 5, Issue 6, Pages 495-499, 1993

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño Conceptual de un Sistema Traductor de Texto a Audio

González Ortiz Liliana Fernanda, Mérida Licona María Edith, Onofre Piedra Aldo Rodrigo y Hernández Lara Derlis

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec División de Ingeniería Informática Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

Este trabajo presenta el diseño conceptual para un sistema traductor de texto a audio a fin de ayudar a las personas con discapacidad visual. La idea del proyecto es desarrollar un traductor que lea texto y lo convierta en audio, este traductor está colocado en la parte baja de una pulsera de goma, proporcionando así comodidad y facilidad de uso, el cliente solo tendrá que palpar los límites del libro y el traductor integrado a la pulsera será el encargado de delimitar los fines del texto para de esta manera poder enviar el texto a una aplicación móvil y así posteriormente convertirlo a audio, esta es la innovación que se ha pensado dar al proyecto, existen tecnologías que convierten el texto a lenguaje braille, pero esto resulta muy difícil al consultar alguna obra literaria. Los resultados esperados son brindar a las personas invidentes las habilidades y el apoyo para desarrollar al máximo su potencial humano, rompiendo con los esquemas tradicionales de la educación especial y buscando su integración con la sociedad mediante el uso de la tecnología. Se desea que el acceso a la información en libros sea más práctico para las personas invidentes y facilite en el aprendizaje mediante dicho sistema.

Palabras clave: Traductor, texto, audio, invidente.

Abstract

This paper presents the conceptual design for a system translator text to audio to help people with visual disability. The idea of the proyect is to make a translator that reads text and turns into audio, this translate is located under a gum bracelet, giving confort, the cliente must touch the limits of the book and the translate will limit the ends of the text, to send the text to a mobile application and then convert it to audio, this is the innovation for the Project. There are tecnologies thar convert the text in Braille lenguaje, but this is very dificult when consulting a book. The results waited are giving to blind people abilities to develop their human potential breaking with the traditional schemes of special education and searching their integration with the society. It want that the Access to information in books are more efficient and faster for the people with visual disability and it make easier the learning.

Keywords: Traduction, text, audio, blind.

1. Introducción

El sistema traductor de texto es un producto que satisface diversas necesidades, en primera instancia brinda apoyo a las personas con discapacidad visual proporcionando un acceso más rápido, fácil y económico a la información situada en libros, periódicos y revistas, ya que debido a la comodidad y portabilidad en la pulsera, la persona invidente no necesita la ayuda de alguien más para su manipulación, cada una de estas personas es capaz de manipular la pulsera de manera independiente lo cual apoyará en sus actividades cotidianas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Con la información a la que es posible acceder con el sistema traductor se le facilita al usuario y motiva a continuar con su formación académica. Con el sistema traductor no es necesario comprar un libro escrito en sistema de escritura en braille por lo que además de economizar, la persona puede integrarse al círculo de lectura de los miembros de su familia sin ningún problema, generando un mejor desarrollo social.

El proceso de creación de los libros escolares a Braille comienza con la digitalización de cada página del texto, para luego incluirlo en un programa de carácteres óptimos y por último al programa ***Duxbury***, que transcribe cada palabra. En la elaboración de un texto para personas con discapacidad visual se utiliza papel Braille gramaje 120, que es fuerte y blanco, se imprime en la impresora Braille y se anilla de forma manual [1].

En general en ingeniería existen varios modelos de diseño, por ejemplo, Cross (1999) los clasifica en dos grupos: descriptivos y prescriptivos, mientras que Takeda (1990) citando a Finger y Dixon (1989) adiciona dos más: cognitivos y computacionales. Para este trabajo se utilizó el modelo de diseño planteado por Asimow (1962) que consta de dos etapas: diseño conceptual (planeación y morfología) y diseño a detalle.

El proceso de diseño conceptual consiste esencialmente en obtener una solución a un problema de diseño particular a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades planteadas, mientras que la fase de diseño a detalle corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución [2].

2. Metodología

La metodología usada en la investigación siguiente es QFD por las razones mencionadas a continuación:

- Aporta una visión objetiva en los usuarios para el desarrollo del producto y de los requisitos que debe tener.
- Menciona la priorización de que características son las más importantes a añadir y cuales no son necesarias.
- Contempla la situación del producto actualmente frente a la competencia y cuáles son los aspectos a mejorar para ser más competitivos.

Los beneficios brindados por la metodología son:

- Menor Tiempo de desarrollo desde el concepto hasta el arranque de producción.
- Pocos cambios de ingeniería con el producto en producción.
- Diseño congruente con las necesidades y expectativas de los usuarios.
- Satisfacción de las necesidades del cliente.
- Traduce los requerimientos del cliente desde un lenguaje ambiguo a los requerimientos de diseño específicos para el desarrollo del producto y su manufactura.
- Los requerimientos del cliente son medibles, alcanzables y potencialmente mejorables.
- Identifica las características críticas para la calidad del producto y su desempeño en el mercado.
- En la planeación de productos y procesos operativos, ayuda a disminuir, e incluso a eliminar, las iteraciones de rediseño que se realizan en los métodos tradicionales ya que incorpora desde el principio los diferentes enfoques que intervienen en la definición de las características de productos y procesos.
- Promueve una mejor comunicación y labor de equipo entre el personal que interviene en todas las etapas, desde el diseño hasta la comercialización del producto.

Se encontraron las necesidades primarias del cliente con la metodología QFD:

- Desempeño: Esta es la razón principal por la cual los clientes compraran el producto.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



- Capacidad: Capacidad del proveedor
- Calidad percibida: Incluye aspectos sensoriales del producto (cómo se siente, cómo se ve).
- Conveniencia: Incluye la facilidad de uso, manejo durante la operación y accesibilidad del equipo.
- Apariencia: Forma y detalles del producto.
- Confiabilidad y durabilidad: Producto libre de fallas durante su uso.
- Seguridad y conformidad: El producto se diseña tomando en cuenta la seguridad como el factor más importante, no sólo para el usuario, sino para todo aquél que esté en contacto con él.
- Instalación y distribución: Condiciones a considerar para estos aspectos.
- Facilidad de mantenimiento: Si se descompone, ¿se puede arreglar?

Dirección de mejora de las características técnicas de diseño

Permite saber si es mejor con mayor cantidad de esta característica particular, o si es mejor con menor cantidad, o si opera mejor si está en el valor del objetivo esperado.
A continuación, en la tabla 1 se muestra una comparación de las ventajas y desventajas que tiene la metodología QFD frente a otras metodologías.

Tabla 1. Comparación de las ventajas de la metodología QFD frente a otras metodologías

	Metodología QFD	**Metodología Cualitativa**	**Metodología cuantitativa**	**Metodología descriptiva**	**Metodología clásica**
VENTAJAS	Busca e indica la necesidad del cliente para diseñar un producto o servicio. Da una visión sobre el producto realizado con la de la competencia	Investigación basada en el análisis	La investigación se basa en lo Ciencias físico-Naturales	La investigación se observa y describe como en su ambiente natural.	Serie de fases consecutivas , conjunto de actividades para implementar un sistema de información
DESVENTAJAS	Pueden existir varias sesiones para determinar la necesidad del cliente	Hace referencia a una investigación referida	Trata de llegar a su máxima objetividad	No existe la manipulación de variables	Se realizan pasos aislados

El QFD (del inglés, ***Quality Funtion Deployment***) fue la herramienta de diseño del proyecto, en el cual se realizaron los pasos indicados buscando la necesidad del cliente, después de obtener la información que ayudará a complementar el proyecto que se aplicará para transformar las demandas del usuario en la calidad del diseño e implementar las funciones que aporten más calidad y lograr el diseño deseado. La función del traductor se basará en la conversión del texto a audio con la ayuda de la programación que se realizó en lenguaje *Java*.

Identificar necesidad: Implementar una herramienta que sirva de ayuda a las personas con discapacidad visual mediante un sistema traductor de texto a audio.

Objetivo: Diseñar e implementar un sistema traductor de texto en audio, que funcione correctamente y cumpla con los requerimientos de los respectivos usuarios.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.

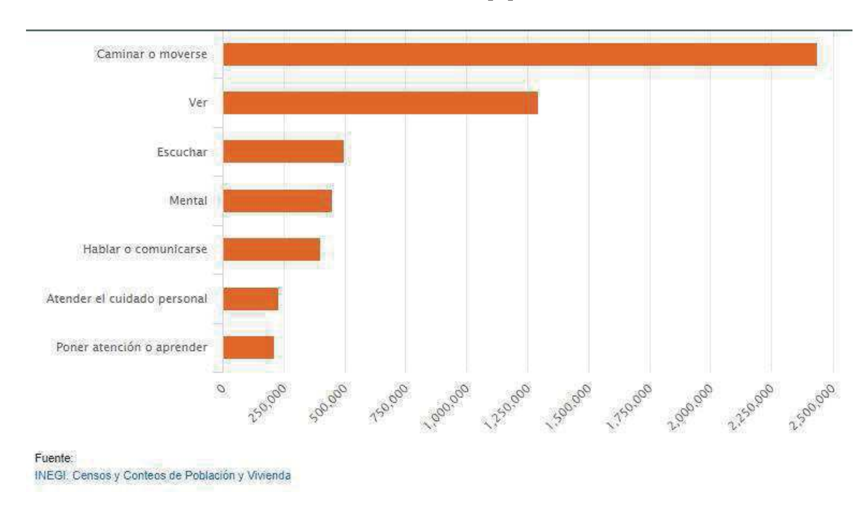


Planteamiento del problema

Mediante el diseño de un sistema traductor de texto, se brindará apoyo a las personas con discapacidad visual, un sector de la población que recibe menor atención gubernamental en México, brindándoles una opción fácil y cómoda de consultar información desde libros de texto.

El último estudio realizado por la INEGI en 2010, informa que en México la ceguera es la segunda causa de discapacidad en la población, rebasando las 467 mil personas que padecen esta discapacidad o son débiles visuales. Más de la mitad de los afectados en un rango de edad de entre los 6 y 29 años no asiste a la escuela por falta de apoyo del gobierno a los discapacitados para estudiar o trabajar [3].

Gráfica 1: Resultados arrojados por la INEGI en el 2010 sobre la población con algún tipo de discapacidad en México [4]



Justificación

Mediante este sistema se genera una herramienta para las personas invidentes que sea de ayuda para acceder de manera más rápida a información escrita, contribuyendo así en su formación académica ya que, aunque existe el sistema de escritura braille no todas las personas con este padecimiento tienen acceso a esta tecnología o en otros casos no se les enseña este sistema de escritura a una temprana edad.

2.1 Obtención de los requerimientos del cliente

Rodolfo Robles Huerta es un invidente de 19 años él tiene 1 año que entro a la Institución llamada ILUMINA CEGUERA Y BAJA VISION. Su mamá menciona que no lo había inscrito a la escuela porque le daba miedo ya que no era un niño normal, durante este año en la Institución él aprendió a leer, a escribir, a servir agua, hacer de comer.

La institución les brinda herramientas tecnológicas como son Abaco, máquina *perkins*, regleta, punzón, atril, también cuentan con clases de computación en la cual han aprendido a encender y apagar una computadora, a usar el teclado y a utilizar un software mediante una guía autodidacta de computación. Dice que él está feliz de estar en esta Institución que le gustaría pasar más tiempo ahí, y que gracias a sus maestras se siente más seguro de realizar las cosas. Se hizo mención sobre el proyecto el cual consiste en un sistema de traducción de texto a audio para libros de texto, Rodolfo mencionó que a él le resultaría más fácil para su educación ya que a él le gusta mucho leer, cuando lee en braille tarda en entender las palabras y al escribir se atrasa mucho cuando la maestra le hace

ISBN: 978-607-9394-14-1.



dictado. Rodolfo asegura que el beneficio para él sería seguir estudiando y desarrollarse más en el ámbito social.

Se tuvo la oportunidad de platicar con la maestra en Desarrollo de Estimulación Temprana Nelly Vargas Morales, la cual dijo que la mayor parte de los niños con esta discapacidad de rango de edad de 6 a 28 años no están inscritos en una escuela de este tipo, el total de personas en la Institución es de 30 personas, el gobierno no apoya a la Institución, por lo que se mantiene del pago de colegiaturas que les otorgan, material por parte de donaciones de Instituciones privadas. De esta consulta se obtuvieron los siguientes requerimientos:

A) *Requerimientos funcionales*

A1. Utilizan un teléfono celular.
A2. Tenga la función de un comando de voz que indique (comienzo, detener).
A3. Tener un controlador de volumen.
A4. Tener el traductor de texto a audio.

B) *Requerimientos físicos*

B1. La pulsera sea ligera, no pese más de 250g.
B2. Resistente al agua, sol, caídas, golpes.
B3. Contenga auriculares Over-ear (aíslan el ruido).
B4. Guardar en cajas resistente a golpes, caídas.

C) *Requerimientos de instalación*

C1. Aplicación fácil de descargar.
C2. Instalación de sistema de Android, IOS.
C3. La pulsera y auriculares sean fácil de adaptar, para poner en función adecuadamente.

D) *Requerimientos de mantenimiento*

D1. Fácil de cambiar cuando estos se desgasten (pulsera y auriculares).

E) *Requerimientos económicos*

E1. No exceda el costo de $4,000.00 pesos.
E2. Pagos accesibles para obtener la pulsera.

F) *Requerimientos de adaptación*

F1. Bajo consumo de batería.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de los requerimientos establecidos por el cliente en obligatorios y deseables, con el fin de diseñar tomando en cuenta todos los requerimientos obligatorios y ver cuáles de los deseables se pueden establecer en el diseño.

Tabla 1. Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables

Obligatorios	Deseables
A1. Utilizar un teléfono celular **A2.** Contenga un comando de voz que indique (comienzo, detener) **A4.** Convertidor de texto a audio **C1**. Aplicación fácil de descargar **C2.** Instalar en sistema Android, IOS	**A3.** Controlador de volumen **B1.** Sea ligera, menor a 250g **B2**. Resistente al agua, sol, caídas, golpes **B3**. Contenga auriculares Overear **B4**. Cajas resistentes a golpes y caídas **C3.** La pulsera y auriculares sean fácil de adaptar para poner en función adecuadamente **D1.** Fácil de cambiar cuando se desgasten (pulsera, auriculares) **E1.** No exceda el costo de $4,000.00 **E2**. Pagos accesibles para obtener la pulsera **F1.** Bajo consumo de batería

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una vez identificados los requerimientos deseables se ponderan para saber su orden de importancia en el sistema y establecer cuales son más prioritarios para ser incluidos en el diseño, lo ideal es que se incluyan todos, pero esto dependerá de que no interfieran en el cumplimiento de los requerimientos obligatorios, como se muestra en la Tabla 2.

Para obtener el cálculo se utilizan dos valores de comparación.

(+). Significa que el requerimiento de comparación es más importante que los demás.

(-). Significa que el requerimiento de comparación no es más importante que los demás.
Una vez que se ha llenado la tabla 2 con los valores de comparación, se calculan los pesos relativos de cada requerimiento deseable mediante la ecuación (1), donde ∑ (+) es el número de veces que el requerimiento fue más importante comparado con los demás.

$$(\%) = \frac{\Sigma(+)}{\quad} * 100 \qquad (1)$$

Tabla 2. Ponderación de los requisitos deseables

	A3	B1	B2	B3	B4	C3	D1	E1	E2	F1	∑(+)	%
A3		-	-	-	-	-	-	+	-	-	1	3.5
B1	-		+	-	+	-	-	+	-	-	3	10.5
B2	-	+		-	-	-	-	+	-	-	2	7
B3	-	-	-		-	-	-	-	-	-	0	0
B4	-	+	-	-		+	-	+	-	+	4	14
C3	-	-	-	+	+		+	+	-	+	5	17.5
D1	-	-	-	-	-	+		+	-	-	2	7
E1	+	+	+	-	+	+	+		-	+	7	24.5
E2	-	-	-	-	-	-	-	-		+	1	3.5
F1	-	-	-	-	+	-	+	-	+		3	10.5
											28	100

Se procede a realizar la tabla 3, en la cual se colocan los requerimientos deseables según el orden de importancia obtenida en la comparación de la Tabla 2.

Tabla 3. Orden de importancia de los requerimientos deseables.

Orden de importancia	Requerimientos deseables	∑(+)	%
1	**E1.** No exceda el costo de $4,000.00	7	24.5
2	**C3.** La pulsera y auriculares sean fácil de adaptar para poner en función adecuadamente	5	17.5
3	**B4.** Cajas resistentes a golpes y caídas	4	14
4	**B1.** Sea ligera, menor a 250g	3	10.5
5	**F1.** Bajo consumo de batería	3	10.5
6	**B2.**Resistente al agua, sol, caídas, golpes	2	7
7	**D1.** Fácil de cambiar cuando se desgasten (pulsera, auriculares)	2	7
8	**A3.** Controlador de volumen	1	3.5

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



9	**E2.** Pagos accesibles para obtener la pulsera	1	3.5
10	**B3.**Contenga auriculares Over-ear	0	0
		28	100

2.2 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Los requerimientos, se tienen que llevar a un nivel de traducción cuantificable, es decir, todos aquellos requerimientos hechos por el cliente hay que definirlos en términos mensurables de ingeniería, de manera que se asociarán directamente con una unidad de medición; aquellos que no puedan ser asociados directamente a una unidad de medición, lo harán con un significado explícito, donde se referirá a la actividad que éste implica, como se muestra en la Tabla 4.

En esta traducción todavía no se pone cantidades a menos que desde un principio el cliente las haya dado, de lo contrario estas se establecerán en las metas de diseño, en las cuales una vez establecidos los términos mensurables de ingeniería, se decretan cantidades específicas que se pretenden lograr en el diseño.

Tabla 4. Términos mensurables de ingeniería

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS
A1. Utilizar un teléfono celular	**A1.**Contar con un dispositivo móvil
A2. Contenga un comando de voz que indique (comienzo, detener)	**A2.**Adaptar un comando de voz
A3. Controlador de volumen	**A3.**Tener controlador de volumen
A4. Traductor de texto a audio	**A4.**Traductor de texto a audio
B1. Sea ligera, menor a 250g	**B1.**Peso igual o menor a 250g
B2. Resistente al agua, sol, caídas, golpes	**B2.**Resistente al agua, sol, caídas, golpes
B3. Contenga auriculares Over-ear	**B3.**Tendrá auriculares
B4. Cajas resistentes a golpes y caídas	**B4.**Estuche resistente a golpes y caídas
C1. Aplicación fácil de descargar	**C1.**Aplicación fácil
C2. Instalacion en Android y IOS	**C2.**Instalación fácil
C3. La pulsera y auriculares fácil de adaptar	**C3.**Adaptación fácil
D1.Fácil de cambiar cuando se desgasten (pulsera, auriculares)	**D1.**Fácil mantenimiento
E1. No exceda el costo de $4,000.00	**E1.**El costo en el mercado menor de $4,000.00
E2. Pagos accesibles para obtener la pulsera	**E2.**Accesibilidad de pago
F1. Bajo consumo de batería	**F1.**Bajo de batería

Metas de diseño:

- Tener disponible un teléfono móvil.
- Sistema que contenga comando de voz.
- Manejo del sistema de altavoces.
- Peso igual o menor a 250g.
- Resistente a golpes, caídas, agua, sol.
- Permitir la reproducción de audio.
- Dimensiones no mayores a 15cm, adaptables a la muñeca del Usuario.
- Estuche protector de caídas y golpes.
- Fácil mantenimiento.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



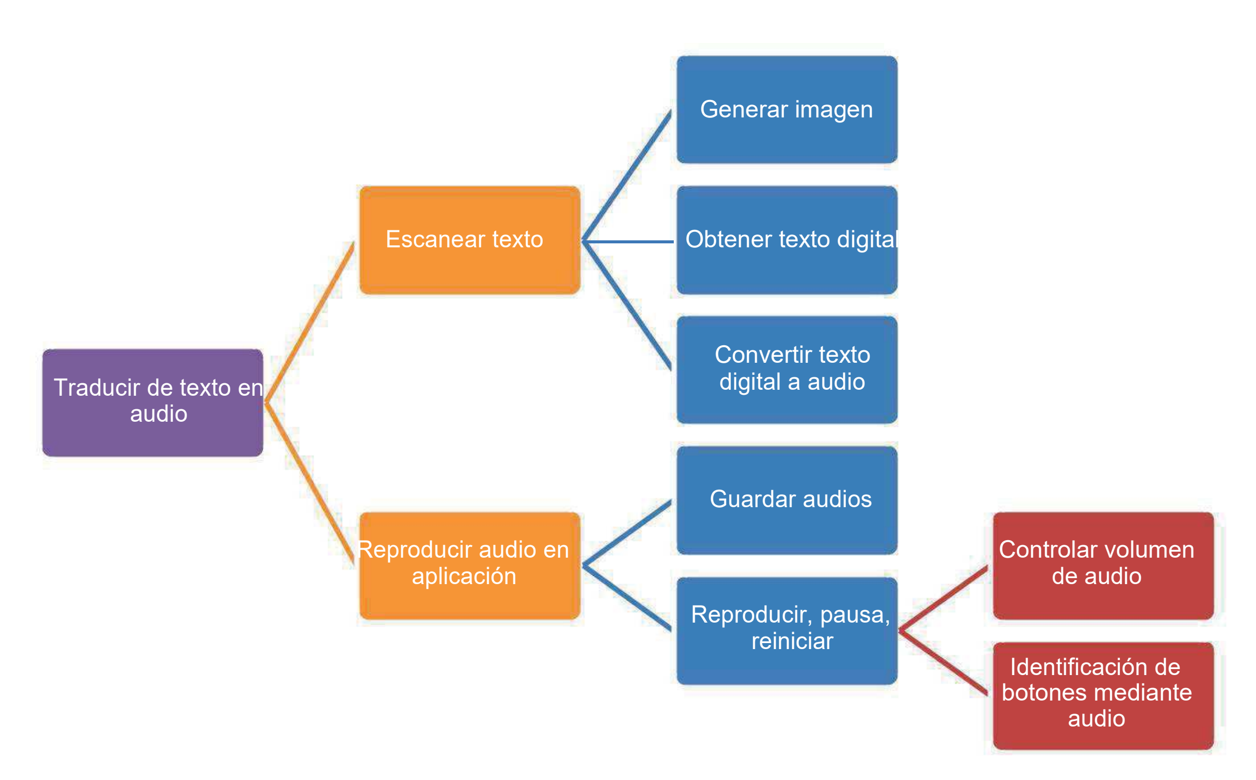
2.3 Análisis funcional del sistema

En el análisis funcional se detalla todas las funciones que el sistema debe cumplir, para esto se delimita la función global o principal del sistema y las sub-funciones que se tienen que realizar para que ésta se pueda llevar a cabo.

La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño, describe el papel a desempeñar del mismo, para lo cual se apoya de funciones de servicio que son todas aquellas acciones que serán realizadas por el sistema que se va a diseñar para dar solución a la necesidad planteada, y que pueden ser globales o de uso.

En la gráfica 2 se puede apreciar el árbol de funciones del sistema a diseñar, en el cual la función global es traducir texto en audio y consta de sub-funciones las cuales deben de realizarse para poder cumplir con la función global y los requerimientos establecidos por el cliente.

Gráfica 2: Árbol de funciones



2.4 Generación y evaluación de conceptos

Una vez establecido el análisis funcional se proponen soluciones para resolver cada función, esto mediante una tormenta de ideas, y así se generan los conceptos que darán forma al sistema o máquina a diseñar, los conceptos para este proyecto se muestran en la tabla 5.

Una vez generadas las posibles soluciones a cada una de las funciones, se tiene que realizar una etapa de evaluación, para esto se utilizan tres filtros que ayudan a obtener el diseño que contemple de mejor manera las funciones y las expectativas del cliente.

El primer filtro es el filtro de factibilidad, donde las posibles soluciones se evalúan con base en que sean elementos que puedan cumplir con las funciones y no se contrapongan con algún requerimiento obligatorio dado por el cliente, como se muestra en la tabla 6.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 5. Generación de conceptos

Función	Concepto			
	A	B	C	D
1. Generar imagen del texto	Sensor	Cámara	Escáner	Tecnologia en "smart watch" o relojes inteligentes
2. Obtener texto en digital	Cámara	Cámara	Escáner	Tecnologia en "smart watch" o relojes inteligentes
3. Convertir texto digital a audio	Aplicación en Java para PC	Aplicación en Android Studio para Android y IOs	Mediante un microcontrolador	Aplicación Móvil en phonegap
4. Reproducir audio en aplicación	Aplicación en Java para PC	Aplicación en Android Studio para Android y IOs	Aplicación en Android Studio para Android y IOs	Aplicación Móvil en phonegap
5. Almacenar audios	Memoria USB	Memoria MicroSD o interna de teléfono	Memoria interna en la pulsera	MicroSD
6. Reproducir, pausa, reiniciar	Reproductor de música	Crear una aplicación	Google Play Music	Pop player
7. Controlar volumen de audio	Botones en la pulsera	Propio del celular	Propio de la PC	Botones en auriculares
8. Identificación de botones y funciones en la aplicación.	Nota musical para diferente función.	Reproducción de la función en audio.	Sonido personalizado por el usuario.	Sonar campana, un número de veces específico para cada función.

Tabla 6.- Primer filtro. Evaluación por factibilidad

Función	Concepto			
	A	B	C	D
1. Generar imagen del texto	-	x	x	x
2. Obtener texto en digital	x	x	x	x
3. Convertir texto digital a audio	x	x	-	x
4. Reproducir audio en aplicación	x	x	x	x
5. Almacenar audios	-	x	x	x
6. Reproducir, pausa, reiniciar	x	x	x	x
7. Controlar volumen de audio	-	x	x	x
8. Identificación de botones y funciones en la aplicación	x	x	x	x
¿Viable?	No	Si	No	Si

Partiendo de la Tabla 6, se puede apreciar que algunas soluciones generadas en los conceptos A y C no cumplen de manera satisfactoria con este filtro, pero para no desechar los conceptos que si cumplieron se genera una mezcla entre los conceptos aceptables con este filtro y se forma un concepto AC.

El segundo filtro es de disponibilidad económica, en el cual se verifica que todas las soluciones a las funciones sean capaces de poderse diseñar o seleccionarse con base en los conocimientos teóricos o la maquinaria actual, de donde se puede apreciar en la tabla 7 que todos los conceptos cumplen de manera adecuada con este filtro.

El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso en el concepto AC y D algunas de sus funciones no cumplen con las expectativas del cliente, lo cual conlleva a sustituir esas funciones por el elemento que se propone en B que, si cumplió con este filtro y así no desechar todo el concepto AC y D, creando el concepto DB (ver tabla 8).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 7. Segundo filtro. Evaluación por disponibilidad económica

Función	Concepto		
	AC	B	D
1. Generar imagen del texto	x	X	-
2. Obtener texto en digital	x	x	-
3. Convertir texto digital a audio	x	x	x
4. Reproducir audio en aplicación	x	x	x
5. Almacenar audios	x	x	x
6. Reproducir, pausa, reiniciar	x	x	x
7. Controlar volumen de audio	x	x	x
8. Identificación de botones y funciones en la aplicación	x	x	x
¿Viable?	Si	Si	No

Taba 8. Tercer filtro. Evaluación basada en los requerimientos del cliente

Función	Concepto		
	AC	B	DB
1. Generar imagen del texto	-	x	X
2. Obtener texto en digital	x	x	X
3. Convertir texto digital a audio	x	x	X
4. Reproducir audio en aplicación	-	x	X
5. Almacenar audios	x	x	X
6. Reproducir, pausa, reiniciar	-	x	-
7. Controlar volumen de audio	x	x	-
8. Identificación de botones y funciones en la aplicación	x	x	-
¿Viable?	No	Si	No

En la Tabla 9, se realizará una matriz de decisión, para la cual se necesitarán los requerimientos deseables y su calificación relativa, con lo que se obtendrá como resultado el concepto ganador, para esto se selecciona el concepto B como el concepto pivote, es decir el que servirá como punto de comparación, si un concepto cumple de mejor manera el requerimiento se colocará un signo (+), y si lo cumple de igual o menor forma se colocará un signo (-).

Tabla 9. Matriz de decisión

Requerimientos deseables	Conceptos			
	Calificación relativa	ACB	B	DB
1. Generar imagen del texto	24.5	+	*	-
2. Obtener texto en digital	17.5	-	*	-
3. Convertir texto digital a audio	14	+	*	-
4. Reproducir audio en aplicación	10.5	-	*	-
5. Almacenar audios	10.5	-	*	+
6. Reproducir, pausa, reiniciar	7	-	*	-
7. Controlar volumen de audio	7	-	*	+
8. Identificación de botones y funciones en aplicación	3.5	+	*	+
∑+		3	*	3
Peso Total	100	42	*	21
Mejor Concepto (Ranking)		1	3	2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.5 Concepto ganador y diseño a detalle

Recordando que la fase de diseño a detalle corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución, basándose en la tecnología disponible se llegó al diseño siguiente:

Después de realizar los filtros correspondientes se obtiene como ganador el concepto B. Por lo cual la pulsera tendrá una cámara debido a su factibilidad y economía, en la parte de debajo de la pulsera para poder realizar la obtención de la imagen del texto para posteriormente realizar la conversión a texto digital y nota de audio mediante una aplicación móvil desarrollada en *Android Studio*., aunque resultaría de más fácil implementación desarrollar el sistema en un "smart watch" o relojes inteligentes debido a la tecnología con la que estos ya cuentan, debido a su elevado costo no se decidió implementarlos ya que se busca dar una solución más económica. Las notas de audio podrán ser almacenadas en la memoria interna o externa del celular. Cada botón en la aplicación tendrá una nota de audio que indique la función que realizará para así facilitar el manejo de la aplicación a la persona invidente.

Algoritmo

A continuación, se muestra el algoritmo de funcionamiento de la aplicación:

1. Ejecución de aplicación móvil
2. Ejecución de escáner
3. Detección de texto
4. Procesamiento de texto capturado
5. Convertir texto capturado en cadena de caracteres
6. Convertir cadena de texto en audio
7. Almacenar nota de audio completa
8. Reproducir audio.

Diagrama de Flujo. En la figura 1 se muestra el diagrama de fijo del funcionamiento de la aplicación

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Inicio

Detección de texto a través de scanner.

No

¿Se detectó escrito?

Si

Procesar texto en computadora.

No

¿Se procesó?

Si

Convertir el texto en audio.

No

¿Se convirtió el texto?

Si

Almacenar audio.

No

¿Se almacenó el audio?

Si

Reproducir audio.

Fin

Figura 1. Diagrama de flujo

Diseño de la aplicación: En la figura 1 se muestra la pantalla principal de la aplicación móvil en la cual se encuentra un mensaje que será reproducido como nota de audio para el invidente.

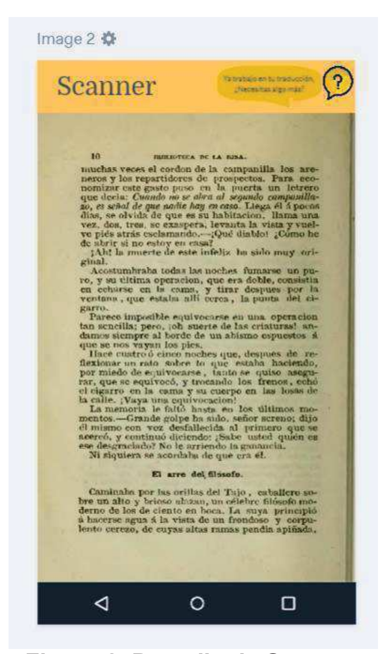
Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 2. Pantalla inicial de la aplicación

En la figura 2 se muestra la pantalla de escáner en la cual se realiza la toma de la imagen para su posterior proceso a una nota de audio, esta cuenta con una nota de audio la cual avisa a la persona invidente el momento en que se esté ejecutando la acción.



10 BIBLIOTECA DE LA RISA.

muchas veces el cordon de la campanilla los areneros y los repartidores de prospectos. Para economizar este gasto puso en la puerta un letrero que decia: *Cuando no se abra al segundo campanillazo, es señal de que nadie hay en casa.* Llega él á pocos dias, se olvida de que es su habitacion, llama una vez, dos, tres, se exaspera, levanta la vista y vuelve piés atrás esclamando.—¡Qué diablo! ¿Cómo he de abrir si no estoy en casa?

¡Ah! la muerte de este infeliz ha sido muy original.

Acostumbraba todas las noches fumarse un puro, y su última operacion, que era doble, consistia en echarse en la cama, y tirar despues por la ventana, que estaba allí cerca, la punta del cigarro.

Parece imposible equivocarse en una operacion tan sencilla; pero, ¡oh suerte de las criaturas! andamos siempre al borde de un abismo espuestos á que se nos vayan los piés.

Hace cuatro ó cinco noches que, despues de reflexionar un rato sobre lo que estaba haciendo, por miedo de equivocarse, tanto se quiso asegurar, que se equivocó, y trocando los frenos, echó el cigarro en la cama y su cuerpo en las losas de la calle. ¡Vaya una equivocacion!

La memoria le faltó hasta en los últimos momentos.—Grande golpe ha sido, señor sereno; dijo él mismo con voz desfallecida al primero que se acercó, y continuó diciendo: ¡Sabe usted quién es ese desgraciado? No le arriendo la ganancia.

Ni siquiera se acordaba de que era él.

El arre del filósofo.

Caminaba por las orillas del Tajo, caballero sobre un alto y brioso alazan, un célebre filósofo moderno de los de ciento en boca. La suya principió á hacerse agua á la vista de un frondoso y corpulento cerezo, de cuyas altas ramas pendia apiñada,

Figura 2. Pantalla de Scanner

La figura 3 muestra la pantalla de Reproducción, se encuentran los botones multimedia con los cuales la persona invidente interactúa para la reproducción de sus notas almacenadas, de igual manera cuenta con audios para que la persona que le de uso pueda ser asistida.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 23, pp. 278-294.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



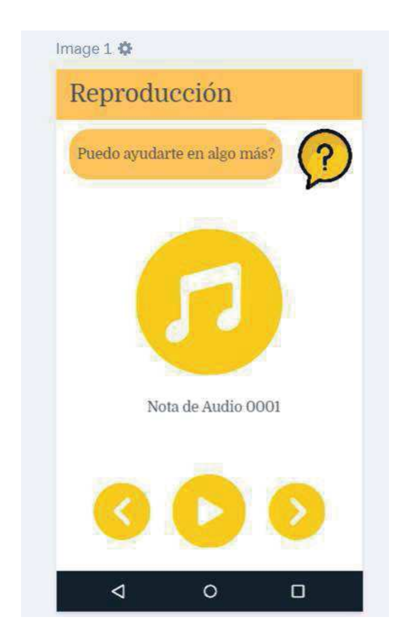


Figura 3. Pantalla de reproducción

Simulación: En la figura 4 se muestra el hardware necesario para el funcionamiento del sistema.

- Teléfono celular.
- Audífonos.
- Pulsera conversora de texto a audio.



Figura 4. *Hardware* utilizado para el funcionamiento del sistema

Audífonos: Se recomienda usar audífonos aisladores de ruido para poder tener un mejor resultado al momento de la reproducción de la nota como se muestra en la figura 5.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 5. Audífonos

Teléfono celular: En este ***hardware*** se debe instalar la aplicación que tendrá comunicación con la pulsera convertidora de texto a audio (Figura 6).



Figura 6. Teléfono celular

En la figura 7 se muestra la pulsera conversora de texto a audio, dicha pulsera será colocada con el scanner por la parte inferior de la muñeca, esta postura en la pulsera es requerida para realizar un correcto funcionamiento de la tarea (figura 7 a 9).

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 7. Pulsera conversora de texto a audio

3. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló la metodología QFD, con el objetivo de obtener un diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos obligatorios del cliente y la mayoría de los deseables. Esta metodología conlleva identificar la necesidad del cliente y sus requerimientos. Después, se clasifican los requerimientos en obligatorios y deseables, luego se procede a la traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería a fin de establecer metas de diseño, generar y evaluar conceptos adecuados para resolver la necesidad, esto a través de filtros de factibilidad, disponibilidad económica, las necesidades del cliente y matrices de decisión, culminando con la determinación del concepto ganador, el cual debe dar solución a la necesidad planteada desde un principio, en este caso el diseño conceptual de un sistema traductor de texto a audio.

Se diseñó el modelo conceptual de una pulsera que mediante un escáner colocado en la parte de abajo es posible obtener la imagen de un texto para posteriormente convertirla en texto digital y así poder generar los audios de reproducción, estos audios pueden ser almacenados si el usuario lo requiere creando así una lista de reproducción a la cual es posible acceder desde un celular a través de una aplicación móvil.

4. Referencias

[1] Alberti M. *Alumnado con discapacidad visual*. Grao, México 2010.

[2] Asociación Latinoamericana de QFD (QFDLAT), 2016. [En línea]. México, disponible en: http://www.qfdlat.com/_Que_es_el_QFD_/_que_es_el_qfd_.html [Acceso el día 2 de abril del 2018].

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2014. [En línea]. México disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825090203.pdf [Acceso el día 2 de Abril del 2018].

[4] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. [En línea]. México disponible en:http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad.aspx?tema=P [Acceso el día 3 de Abril del 2018].

[5] Cross N. *Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos*. Limusa, México 2009.

[6] García M., Alcaide J., Gómez T., Collado, D. & Peris J. *Fundamentos de diseño en ingeniería*. Limusa, México, 2010.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[7] Dym C & Little P. *El proceso de diseño en ingeniería*. Limusa, México 2009.

[8] González M. *QFD, La Función de la calidad, Una guía práctica para escuchar la voz del cliente*. Mc. Graw Hill. México, 2000.

[9] Hernández D.; Barrera D.; Álvarez; Benítez M.; Hernández G. *Diseño conceptual de un dispositivo electrónico de almacenamiento y conteo de monedas*. CIEES, p.p. 1-9, México, 2016.

[10] Calvo Hernando, M. *La prensa y la divulgación científica,* Castilla,España 2016.

[11]Calvo Hernando, M. *Nuevos escenarios y desafíos para la divulgación de la ciencia.*Castilla,España 2005.

[12] Diderot, D. *Carta sobre ciegos para uso de los que ven*. El cuenco de Plata,Francia 2011.

[13] Doménech Riera, X. *Historia de la Tiflotecnología en España*. En: No Solo Usabilidad, nº 9, España 2010.

[14] Carola, y Vilar, M. *Producción de materiales didácticos para personas con discapacidad visual*. Ministerio de Educación de la Nación, Colombia 2013.

[15] Carola y Vilar,M. *Ministerio de Comunicaciones de Colombia*. Nuevas tecnologías de comunicación y acceso a la información para personas con discapacidad.Colombia 2013.

[16]Hernández Fernández,B. *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill,Colombia 2016.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 295-304.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sistema Electrónico para la Detección de Gas Metano y Dióxido de Carbono en Ganado Bovino

Osorio Cruz Francisco, Hernández Rivera Raúl, Romero de la Rosa Pablo Iván y Aguilera Hernández Leodegario G.

Departamento de Ingeniería Mecatrónica
Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca

Resumen

En la actualidad hay técnicas y dispositivos que detectan y cuantifican gases de efecto invernadero, en este proyecto se realiza un dispositivo electrónico basado en sensores de gas que miden la cantidad de gas metano y dióxido de carbono orientado a ganado bovino, los dispositivos existentes perjudican física y emocionalmente al animal es por ello que se diseñó un tipo de mascara fragmentado en dos partes, el emisor que se coloca en el animal cuenta con dos sensores de la familia MQ programados bajo la plataforma Arduino y la comunicación de datos se realizó por el protocolo ZigBee mediante los módulos de radio frecuencia XBee y el receptor está programado al igual que el emisor con la plataforma Arduino y la recepción de datos es por el XBee. La visualización de los datos se realiza por medio del monitor serie y por un LCD.

Palabras clave: Sensores de Gas, Metano, Dióxido de carbono, XBee, efecto invernadero, Ganado Bovino.

1. Introducción

El dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), son los principales gases de efecto invernadero y responsables del cambio climático [1]. Un Gas de Efecto Invernadero (GEI) es aquel que atrapa la radiación infrarroja (calor) en la atmósfera, bloqueando su salida lo cual deriva en un aumento de la temperatura del planeta, convirtiéndose en una amenaza para los seres vivos [2]. Los GEI son producidos por fuentes naturales y antropogénicas. Como fuentes naturales son humedales, erupciones volcánicas, evaporación de agua, pantanos, etc., y como fuentes antropogénicas aquellas que se derivan de las actividades humanas como el sector energético, sector agropecuario y sector industrial. De estas el sector agropecuario emite el 45% de CH_4 (fermentación entérica y manejo de estiércol), 9% de CO_2 (fermentación entérica) y 56% de Óxido nitroso (N_2O) (manejo de estiércol y la explotación de suelos)[3], donde es evidente que el CH_4 es el elemento más representativo y que se deriva principalmente de la actividad de producción de ganado bovino.

El ganado bovino emite CH_4 y CO_2 debido a su proceso digestivo, que ocurre bajo condiciones anaeróbicas, participan diferentes tipos de bacterias. Éstas, degradan la celulosa ingerida a glucosa, que se fermentan luego a ácido acético y reducen el dióxido de carbono, formando CH_4 que representa energía alimenticia que es convertida a gas [4]. La cantidad generada de CH_4 está en función de las características de animal (p. ej., edad, peso, raza) , a la cantidad y tipo de alimentación [5].

Para saber la cantidad de CH_4 producido por un bovino es necesario utilizar un equipo cuantificador que sea capaz de medir en forma correcta este parámetro.

El objetivo es diseñar e implementar un sistema electronico para la deteccion de gas metano y dioxido de carbono en ganado bovino cuyas ventajas a las demas tecnicas de medicion, es que no

ISBN: 978-607-9394-14-1.



sea invasiva, donde se implemete el protitpo tendra la capacidad me medir los dos gases en partes por millón, ademas es un sistema inalambrico basado en modulos de radio frecuencia en tiempo real.

2. Problemática

Los gases de efecto invernadero directos tratados de los inventarios son de emisiones son: el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NOx). Los tres primeros contribuyen con el 80 % del forzamiento adicional del cambio climático, se toma como el CO2 como gas de referencia, el potencial de calentamiento del CH_4 es 23 veces más que el CO_2 y el N_2O es 296 veces más, estos gases son los principales que emiten la ganadería [1].

Por condiciones naturales del ganado bovino contribuye de forma directa a la emisión de CH_4 por su proceso de digestión donde actúan microorganismos anaeróbicos que se le conoce como fermentación entérica. Proceso sucede cuando el animal consume alimento, los microorganismos la descomponen y gran parte de la energía alimenticia no es aprovechada por el animal y es convertida en CH_4 [6] y este es expulsado por vía eructo (por el hocico) y una pequeña parte es desechada por el excremento. Se sabe que la ganadería emite estos gases, también como los emite, el problema surge cuando queremos cuantificar estos tipos de gases, hay prototipos existentes que, por su diseño e implementación tienen a dañar físicamente y emocionalmente al rumen.

3. Antecedentes

3.1 Vaca mochilera

En Argentina se ha ensayado una técnica para colectar el gas producido en el rumen, Se realiza mediante un corte circular que se realiza a partir de un trocar de aproximadamente 2.5 centímetros que corta la piel, los planos musculares y el peritoneo hasta llegar al interior del rumen y se le coloca tubos de plástico que conecta al estómago del rumen con la bolsa de recolección de polietileno grueso de 350l de capacidad. La producción diaria de gas fue en promedio de 911.7 L y la concentración de CH_4 varió de 20 a 32 % y representó en promedio 247 L d-1[2].

3.2 Gases trazadores

Esta técnica se fundamenta mediante la liberación de una cantidad de gas trazador, se coloca una cabezada que sostiene un capilar sobre el morro, a través del cual se colecta muestra de aire expirado y este se almacena en un tubo de vacío colocado alrededor del cuello del animal, debe conocerse la tasa de liberación antes de su inserción de aire expirado, el tubo se presuriza con nitrógeno y se determina las concentraciones de SF_6 y CH_4 por cromatografía. En esta técnica se debe conocer la tasa de liberación antes de su inserción en le rumen ya que hay posibilidad que afecte la proporción de los gases en la muestra expirada [7].

3.3 Cámaras respiratorias

Este método es llamado “Estándar de oro” para la medición de gas metano en ganado bovino y es usado para validar otros sistemas de medición, ya que se pueden realizar mediciones continuas, mediante el sistema de adquisición y control de datos conectados a una computadora y procesado por una software desarrollado en entorno de LabVIEW [8] [9].

Las pérdidas de energía en las heces y la orina se pueden determinar fácilmente en ovejas y ganado vacuno en las jaulas de metabolismo, pero para determinar la energía que pierden como gas combustible, es como el metano, implica la medición cuantitativa del intercambio gaseoso y la uso de equipos mucho más complejos y costosos [10][11].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Materiales y métodos

4.1 *Acondicionamiento de señal*

Los sensores son dispositivos capaces de transformar magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas, hay sensores para cada tipo de gas, la familia MQ son sensores resistivos, el principio de operación de estos sensores consiste en la oxidación del gas en la superficie del elemento catalítico por medio de calor generado a partir de una corriente eléctrica que circula por la bobina. Cuando el gas ha sido oxidado, provoca un incremento superior de temperatura y como consecuencia un aumento en su resistencia eléctrica mientras que en el elemento de referencia su resistencia eléctrica permanecerá sin cambios. Los sensores contienen un módulo para su fácil utilización, tienen una señal de salida digital y una señal de salida analógica, esta última, es la que se usa para determinar la cantidad de gas en el ambiente.

Los sensores utilizados son de la familia MQ, MQ-4 y MQ-7 de gas metano y dióxido de carbono respectivamente, son sensores comerciales que cuentan con ventajas, tanto en el precio como en las salidas que prorporciona y es facil de usar para cualquier aplicación. Los voltajes de operación de los sensores son de 2 a 5 volts y un consumo de 750 mW. Para el sensor de gas metano tiene un rango de deteción de 200 a 10000 ppm y para el sesor de dioxido de carbono es de 20 a 2000 ppm.

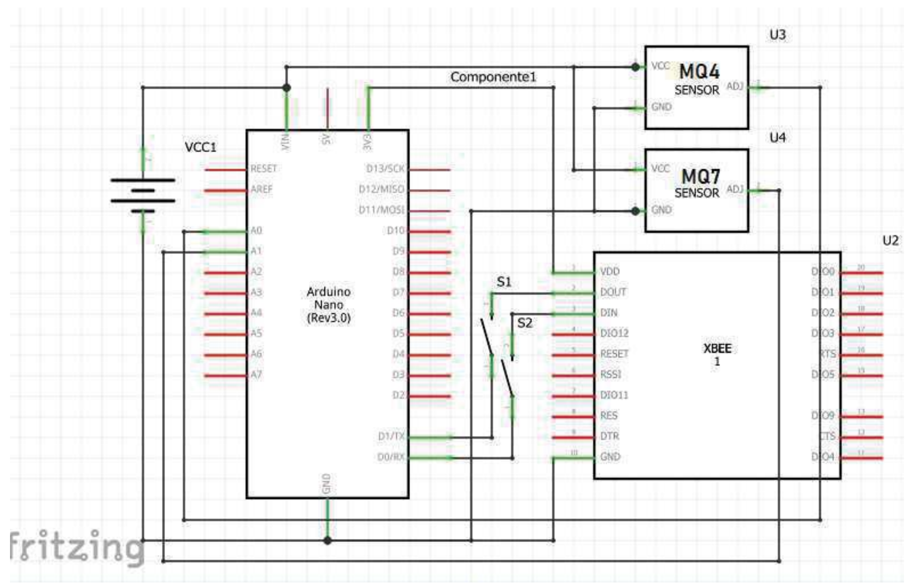


Figura 1. Esquemático emisor

En la Figura 1 presenta los componentes del emisor que esta constituido por el Arduino Nano con ATMEGA328, se empleo esta tarjeta de adquisicion de datos por sus pequeñas dimensiones y para la transmisión de datos se raliza a tráves del protocolo Zigbee de una banda libre de 2,4 Ghz, con una velocidad de transmisión hasta 256 kbps mediante los modulos de radiofrecuencia XBee de la serie 2B con un alcance de aproximadamente de 1.5 km.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



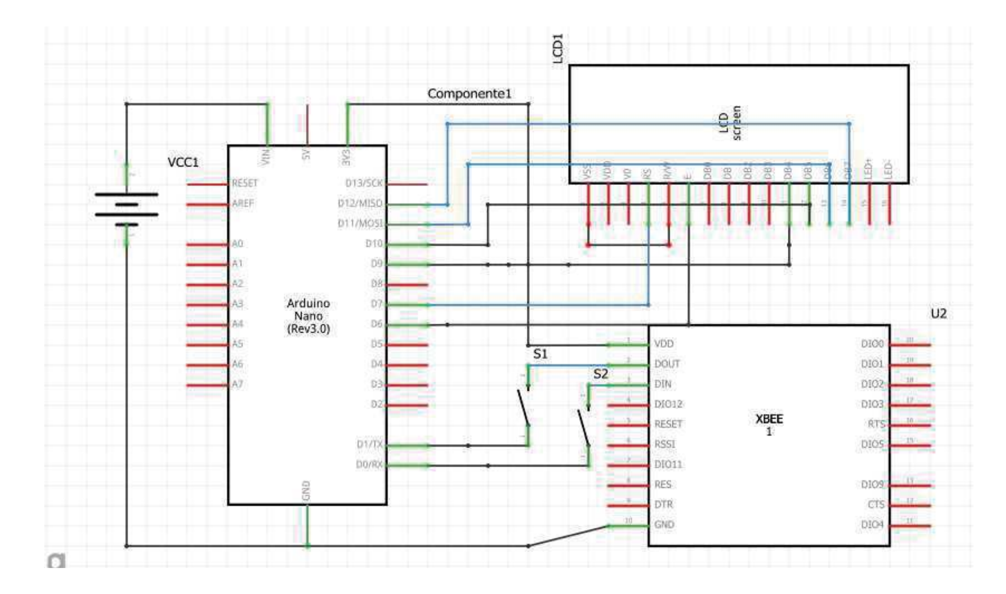


Figura 2. Esquemático receptor

En la Figura 2 se observa el esquemático del receptor que lo conforma el Arduino Nano, el módulo RF XBee y las salidas para el LCD de 16x2 donde se visualizaran los datos de los sensores.

4.2 *Configuración de los XBee*

Para configurar los módulos se utiliza una computadora, el software XCTU, dos módulos inalámbricos XBee de 63mw y un XBee Explorer Dongle. Se realiza una red inalámbrica de punto a punto con un coordinador y un receptor, la conexión para la configuración es por medio de los puertos COM de una PC, se tiene que fijar la dirección alta y baja del otro modulo que se encuentra al reverso de los módulos.

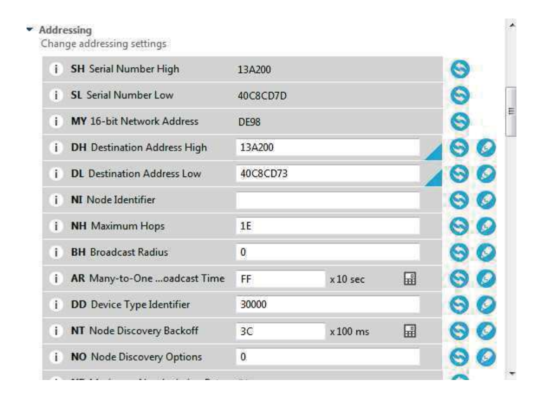


Figura 3. Dirección alta y baja del XBee

5. *Programación*

Para la programacion se realiza en la plataforma arduino, la secuencia del programa es basica, se declaran las entradas analogicas de los sensores y se ejecuta la siguiente conversion a partes por millon:

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 295-304.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$(ppm\,Metano) = e\left[\frac{In\frac{(5-Vout)}{Vout} * \frac{10}{Ro * 12695}}{-0.364}\right] \quad (1)$$

$$(ppm\,Dióxido\ de\ carbono) = e\left[\frac{In\frac{(5-Vout)}{Vout} * \frac{20}{Ro * 25112}}{-0.747}\right] \quad (2)$$

De acuerdo con la hoja de datos de los sensores la ecuación 1 y 2 muestra la conversión a partes por millón con base en el voltaje de los sensores, la resistencia de carga y la salida analógica, todo esto se introduce dentro del código de programación como se muestra en la figura 4.

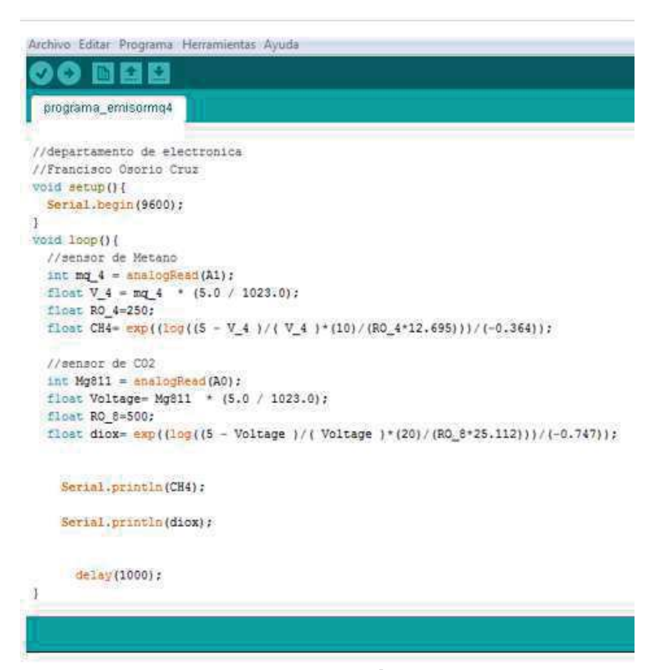


Figura 4. Programación del emisor

Para el envío de los datos es por medio del puerto serial del Arduino y directamente al compilar se transfiere al Tx y Rx de la tarjeta. Para la programación (ver figura 5) del receptor es necesario líneas de código el cual detecte datos en el puerto serial del Arduino provenientes del emisor y hacer la conversión al tipo de dato cadena para visualizar en el LCD. El XBee realiza solamente la vía de transmisión con un protocolo PEER TO PEER (punto a punto)

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

sketch_mar28b §

```
void setup(){
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(1, 0);
  lcd.print("CH4");

  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print("ITSTA");
  lcd.setCursor(12, 0);
  lcd.print("CO2");

   Serial.begin(9600);

            }
void loop() {

  while (Serial.available() > 0 ) {
   letra = Serial.read();
    codigo.concat(letra);
    delay(10);
  }
  if (codigo.length() > 0) {
    lcd.setCursor(1, 1);
      lcd.print(codigo);
      Serial.print(codigo);
      codigo="";
  delay(1000);
  }
}
```

Figura 5. Programación del receptor

6. Resultados

Con el apoyo de cuantificadores se calibra el prototipo usando el Air Quality Guardian para el dióxido de carbono y el combustible gas Alarrm Detector como se muestra en la figura 6 y 7



Figura 6. Calibración del sensor MQ-4

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 7. Calibración del sensor MQ-7

En las tablas 1 y 2 muestras algunas comparaciones de los datos obtenidos del prototipo con los cuantificadores industriales y refleja los datos son similares y en algunos datos hay una diferencia mínima.

Tabla 1. Prototipo VS cuantificador CH_4

Gas metano	
Prototipo (ppm)	Cuantificador de metano (ppm)
224	250
235	250
245	250
278	300
268	250
200	200
210	200

Tabla 2. Prototipo VS cuantificador CO_2

Dióxido de Carbono	
Prototipo (ppm)	Cuantificador de metano (ppm)
431	431
435	433
436	435
400	405
410	413
380	384
350	353

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 24, pp. 295-304.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



7. Pruebas en campo

Para las pruebas en campo se construye un tipo de mascara para sujetar los sensores frente al hocico del animal aproximadamente de 3 centímetros [12] y en la parte de la nuca se le coloca el transmisor como se muestra en la figura 8, el arnés puede ajustarse al tamaño de rumen.



Figura 8. Implementación en el rumen.

Las mediciones se realizaron durante un minuto (ver tabla 3) ya que el código fuente está programado para tomar un dato por segundo para observar con mayor facilidad, y el animal se encuentra en condiciones normales sin restricción alguna.

Tabla 3. Número de muestras.

Frecuencia de muestreo	CH_4 en ppm	CO_2 en ppm
1	301.99	1701.83
2	269.04	1797.39
3	253.50	1781.28
4	269.04	1829.84
5	253.50	1846.18
6	238.58	1912.30
7	224.27	1962.70
8	210.53	1996.68
9	224.27	2013.79
10	210.53	1979.65
11	224.27	1765.24
12	210.53	1749.27
13	197.37	1717.57
14	210.53	1686.16
15	197.37	1655.04
16	184.77	1608.91
17	172.72	1578.53



18	184.77	1563.44
19	172.72	1518.61
20	161.21	1503.35
21	150.21	1416.49
22	161.21	1402.18
23	139.73	1373.78
24	150.21	1331.69
25	129.74	1317.79
26	184.77	1303.97
27	172.72	1276.53
28	197.37	1249.36
29	184.77	1235.87
30	197.37	1169.47
Total	6039.61	48244.89

8. Discusión

El prototipo electrónico cuenta con ventajas en la aplicación en ganado bovino, en comparación con [8] son muy costosos y restringen a los animales a un lugar cerrado que no son condiciones normales de pastoreo, en [7] los datos pueden variar de acuerdo al que le introducen al rumen antes de medir y en [2] afectan la integridad física con el orificio al rumen, es incómodo ya que no puede realizar sus actividades cotidianas y al ser afectado emocionalmente repercute en los productos derivados como son la leche y la carne. En un futuro se pretende seguir con el estudio y rediseño de este dispositivo electrónico aplicando más sensores y un mecanismo para que al momento de aplicárselo no cause dificultad de comer los alimentos y no dañe los sensores.

9. Conclusiones

Este sistema electrónico presenta una opción para la medición de gases de efecto invernadero tanto en ganado bovino como en cualquier lugar de la intemperie, es un sistema compacto con grandes ventajas, una de ellas es la transmisión inalámbrica por medio de los módulos RF con mayor alcance que los protocolos como el Bluetooth y WI-FI; cabe mencionar que es la misma banda de transmisión de 2.4 GHz pero diferente el rango de alcance, los XBee supera con un alcance de aproximadamente de una milla. Por su peso de 500 gramos no propicia una molestia en las actividades normales para el bovino.

Referencias

[1] H. Blanco, Janet, Álvarez, A., & Morgan, "Contribución de la ganadeía a laas emisiones de gases de efecto invernadero.," *Cienc. y Tecnol. Ganad.*, vol. 5, no. 1, pp. 51–57, 2011.

[2] G. Berra and L. Finster, "Emisión de Gases de efecto invernadero," *Idia XXI. Rev. Inf. sobre Investig. y Desarro. Agropecu.*, vol. 2, no. 2, pp. 212–215, 2002.

[3] K. A. Baumert, T. Herzog, and J. Pershing, *Navigating the numbers*. 2005.

[4] J. Carmona, D. Bolivar, and L. Gildardo, "El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo,"

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Rev. Colomb. Ciencias Pecu., vol. 18, pp. 49–63, 2005.

[5] K. A. Johnson and D. E. Johnson, “Methane emissions from cattle.,” *J. Anim. Sci.*, vol. 73, no. 8, pp. 2483–2492, 1995.

[6] S. J. Bunglavan, “Methanogenesis and recent techniques for mitigation of methanogenesis in ruminants,” *J. Livest. Sci.*, vol. 5, pp. 35–48, 2014.

[7] J. Bonilla and C. Lemus-flores, “Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático : Revisión Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático . Revisión global climate change .,” no. June 2014, 2012.

[8] F. J. B. Tremblay, D. I. Massé, and C. V. Bluteau, “Accuracy assessment of methane emissions measurement systems tailored to mechanically ventilated livestock buildings,” *Can. Biosyst. Eng. / Le Genie des Biosyst. au Canada*, vol. 56, no. 1, p. 7.1-7.10, 2014.

[9] J. Roman, Sergio & Hernandez-Medrano, “Producción y medición de Metano (ch4) en el Ganado Bovino,” *Inst. Nac. Investig. For. Agric. y Pecu.*, no. September, 2016.

[10] K. L. Blaxter and J. L. Clapperton, “Prediction of the amount of methane produced by ruminants,” *Br. J. Nutr.*, vol. 19, no. 1, p. 511, 1965.

[11] J. Canul, “Design and construction of low-cost respiration chambers for ruminal methane measurements in ruminants Diseño y construcción de cámaras de respiración de bajo costo para la medición de metano entérico en rumiantes,” vol. 8, no. 2, pp. 185–191, 2017.

[12] S. Barrón, “Metodología TRIZ para el diseño de un prototipo de gas metano y dióxido de carbono en ganado vacuno.,” Instituto Tecnologico Superior de Tantoyuca, 2017.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 305-320.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño Conceptual de un Sistema de Monitoreo de Objetos para Motociclistas

Sánchez Cuéllar Valeria Paola, Zayas Maya Karla Patricia, Guzmán Rivera Julián Alberto y Hernández Lara Derlis.

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
División de ingeniería informática
Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

*Este artículo describe la implementación de un sistema embebido (**SE**) con el fin de contribuir a la toma de decisiones sensatas por parte de los motociclistas, mediante la obtención de información relevante. Dicho sistema cuenta con sensores de proximidad, así como con la visualización de información en un dispositivo móvil, que mostrará al conductor los datos enviados por el **SE**, tomando en cuenta que esto no será una distracción, ya que solo se visualizará la información precisa de los elementos que obstruyan o se aproximen a determinada distancia y pongan en riesgo la integridad del motociclista, para esto se tendrá una alerta de tipo visual que contará con una variación de señal iluminando la pantalla con el color respectivo al grado de riesgo que se encontrará en su trayecto, indicando las alertas que apoyarán al conductor en la toma de decisiones para poder evitar el siniestro al que se puede enfrentar. La metodología utilizada para el diseño conceptual fue QFD (del inglés, **Quality Funtion Deployment**), basándose en los requerimientos de los usuarios finales, para posteriormente pasar a la etapa de diseño a detalle.*

Palabras clave: Sistema embebido, sensores de proximidad, prevención de accidentes, motociclistas.

1. Introducción

Un sistema embebido es un sistema electrónico diseñado específicamente para realizar una determinada función, habitualmente formando parte de un sistema de mayor entidad. La característica principal es que emplea para ello un procesador digital (CPU) en formato microprocesador, microcontrolador o un procesador digital de señales (DSP por sus siglas en inglés de ***digital signal processor***) lo que le permite aportar "inteligencia" al sistema anfitrión al que ayuda a gobernar y del que forma parte [1].

Los accidentes no solo acontecen por no tomar precauciones como no colocarse un casco o conducir en estado de ebriedad, sino que, aunque un motociclista circule tomando todas las precauciones posibles, corre riesgo de que un automóvil que no esté tomando precauciones impacte con él. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los accidentes de tránsito causan 1.2 millones de defunciones anuales y representan la principal causa de muerte entre jóvenes de 15 a 29 años en todo el mundo. El 23% de todas estas muertes se concentra en los motociclistas, el 22% en peatones, y el 4% en ciclistas. Es decir, el 49% de todas las muertes por accidentes viales se concentra en los usuarios más vulnerables de la vía pública, según muestran las cifras de OMS en el Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2015, se muestra en la figura 1 las causas por las cuales se presentan los accidentes en motociclistas [2].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



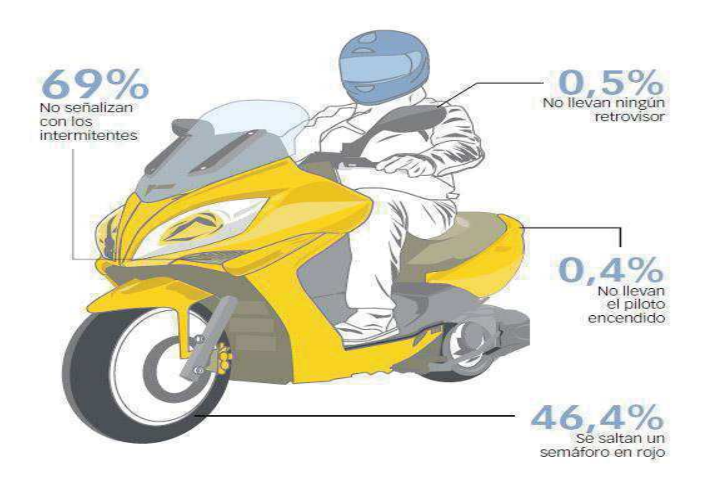


Figura 1. Situaciones por las cuales se presentan los accidentes [2].

En general en ingeniería existen varios modelos de diseño, por ejemplo, Cross (1999) los clasifica en dos grupos: descriptivos y prescriptivos, mientras que Takeda (1990) citando a Finger y Dixon (1989) adiciona dos más: cognitivos y computacionales. Para este trabajo se utilizó el modelo de diseño planteado por Asimow (1962) que consta de dos etapas: diseño conceptual (planeación y morfología) y diseño a detalle.

El proceso de *diseño conceptual* consiste esencialmente en obtener una solución a un problema de diseño particular a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades planteadas, mientras que la fase de *diseño a detalle* corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución [1].

2. Antecedentes

2.1 Motocicleta eléctrica AEV (Autobalanced Electric Vehicle)

AEV es una moto 100% eléctrica que combina las ventajas propias de una moto con la incuestionable seguridad de un coche. El motivo es sencillo: AEV no se cae. Da igual que la inclines o incluso que tengas un accidente; en ningún caso se va a caer. Y es que esta moto dispone de una tecnología espacial para desarrollar un sistema de giroscopios, idénticos al que usan los satélites para geo-posicionarse, e implantarlo en la moto AEV. Si la moto tiene un accidente, los giroscopios absorberán la energía y conseguirán mantener el equilibrio. Se está, en definitiva, ante un vehículo deportivo eléctrico, equilibrado, cerrado y totalmente seguro. AEV llegará al mercado en 2018 a un precio de 24.000 euros, se muestra en la figura 2 el sistema de giroscopios (elementos amarillos) con el que cuenta AEV, y en la figura 3 el modelo final de AEV [3].

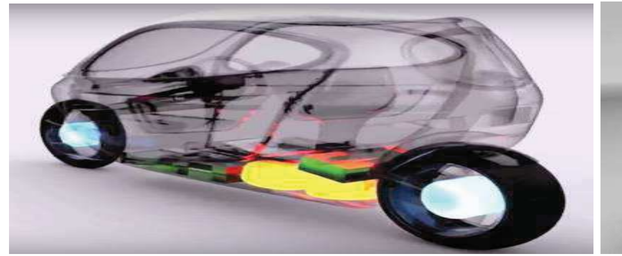


Figura 2. Giroscopios de AEV [3].



Figura 2.1. Moto AEV [3].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 305-320.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.2 Casco inteligente

El funcionamiento del dispositivo que bloquea el sistema de encendido de una motocicleta fue socializado en el Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social de Argentina, con el objetivo de mostrar su efectividad y pedir el apoyo para llevar adelante el proyecto de ley para la implementación de este. En ese sentido, el Ing. Mario Jara, inventor del dispositivo dijo que el casco tiene una emisión de radiofrecuencia que emite una frecuencia programada para cada moto, y que permite la conexión casco-moto. “Se bloquea el sistema de arranque, encendido, eléctrico y se sabe que las motos cuentan con un sistema de generación de corrientes que es magnético y sobre eso está el sensor que inhibe la producción de corriente para que la moto arranque con patadas”, explicó. El sistema cuenta con un sensor de peso que está regulado para que viajen solamente dos personas, y si se sube un tercero, ya sea un bebé, no funcionará. El biciclo arranca solamente si el conductor tiene puesto su casco. Así también, el motociclista que haya ingerido bebidas alcohólicas no podrá encender el motor de su vehículo, en la figura 4 se muestra el casco que está ligado a un sistema que impide la circulación ante irregularidades [4].



Figura 4. Casco Inteligente [4].

3. Desarrollo del proyecto

3.1 Objetivo

Obtener el diseño conceptual de un sistema embebido en motocicletas que funcione para brindar la información del monitoreo de objetos a ciertos rangos de distancia, que al identificarlos envié una señal de alarma al conductor e informe la distancia que existen entre la motocicleta y el objeto, y de esta forma el usuario pueda tomar una decisión ya que de la decisión tomada será la que pueda evitar el accidente, siendo este sistema adaptable al espacio de la motocicleta, manejando la información correcta que es obtenida de los sensores y que sea de fácil interpretación para el usuario final.

3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar el sistema utilizando los recursos tecnológicos existentes.
2. Utilizar una metodología de diseño que tome en cuenta la opinión y necesidades del usuario final, en este caso los motociclistas.
3. Realizar el diseño conceptual de ingeniería.
4. Realización de pruebas.

3.3 Características

En la tabla uno se describe las características más significativas del proyecto realizado, mientras que en la tabla dos se muestran las necesidades a cubrir por el sistema.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Características con las que cuenta el sistema.

Sistema	Características	Necesidades que satisface
Sistema para monitoreo de objetos para motociclistas	Conjunto de sensores receptores de proximidad con conexión a un dispositivo móvil para mostrar objetivos cercanos	Seguridad y factibilidad

Tabla 2. Necesidades que va a cubrir el sistema.

Sistema	Necesidades que satisface
Sistema para monitoreo de objetos para motociclistas	• Proporcionar información para la toma de decisiones del conductor • Impedir distracciones al conducir • Compatibilidad con medios de transporte de 2 ruedas

3.4 Metas

1. Que el sistema logre detectar los objetos.
2. Aportarle al conductor la información de los objetivos que se encuentran a su alrededor.
3. Disminuir el riesgo de accidentes a los usuarios de motocicletas.
4. Que el sistema sea amigable y de fácil uso para el usuario final (motociclistas).
5. Que el sistema pueda adaptarse correctamente a la motocicleta.

3.5 Metodología

Para la realización del diseño en Ingeniería se tomaron en cuenta dos etapas: diseño conceptual y diseño a detalle. El proceso de **diseño conceptual** consiste esencialmente en obtener una solución a un problema de diseño particular a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades planteadas, mientras que la fase de **diseño a detalle** corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución. Para la obtención del diseño conceptual del prototipo, se utilizó la metodología **QFD** (por sus siglas en inglés, ***Quality Function Deployment***), con la cual se puede llegar a un diseño funcional y competitivo, señalando que éste puede ser mejorado en la etapa de diseño a detalle [5].

3.6 Obtención de requerimientos del cliente

Para la obtención de los requerimientos se tomaron muestras de 30 encuestas, ya que se quiere estimar una media que es una mediana de la varianza de la población, y está demostrado que para datos tendientes a una media este valor es significativo para su análisis. De dicha muestra se obtuvieron los siguientes requerimientos para el sistema a implementar:

A. Requerimientos funcionales:

A1. Detectar objetos en proximidad con el motociclista.
A2. Medir la distancia entre la motocicleta y los objetos que se encuentren cerca o dentro su espacio de trabajo.
A3. Un sistema que al medir la distancia pueda identificar los objetos de más proximidad a la motocicleta.
A4. Transmitirá la información trascendente hacia un dispositivo de visualización.
A5. Interpretar la información obtenida de los sensores.
A7. Mandar alertas según sea necesario.
A8. Mostrar cuando el objeto ya está saliendo del rango y no es peligroso.
A9. Realizar configuraciones en la pantalla.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



B. Requerimientos físicos:

B1. El sistema debe contar con sensores de proximidad.
B2. Se contará con una pantalla que muestre la información.
B3. Se contará con componentes que permitan la comunicación entre los sensores, y la pantalla.

C. Requerimientos de instalación:

C1. Adaptación del sistema en cualquier motocicleta.
C2. Que los componentes no ocupen demasiado espacio y colocarlos en lugares que no sean visibles a excepción de la pantalla.
C3. Que los componentes sean instalados de una manera fija
C4. Que la motocicleta pueda energizar los componentes.

D. Requerimientos de mantenimiento:

D3. Refacciones fáciles de conseguir.

E. Requerimientos económicos:

E1. Optimizar el costo de diseño.

Al clasificar los requerimientos en obligatorios y deseables, se podrán identificar los que deben de estar en el diseño, que en este caso serían los obligatorios y los deseables que serán ponderados, la clasificación queda como se muestra en la tabla 3. De acuerdo con la ponderación, los requerimientos deseables quedarían clasificados como se muestran en la tabla 5, ya que son el resultado de la ponderación que se llevó a cabo en la tabla 4.

Tabla 3. Ponderación de los requerimientos deseables.

Requerimientos	
Obligatorios	**Deseables**
A1. Detectar objetos en proximidad con el motociclista	**A8**. Mostrar cuando el objeto ya está saliendo del rango y no es peligroso
A2. Medir la distancia entre la motocicleta y los objetos que se encuentren cerca o dentro su espacio de trabajo	**A10**. Realizar configuraciones en la pantalla
A3. Un sistema que al medir la distancia pueda identificar los objetos de más proximidad a la motocicleta	**C1**. Adaptación del sistema en cualquier motocicleta
A4. Transmitirá la información trascendente hacia un dispositivo de visualización	**C3**. Que los componentes sean instalados de una manera fija
A5. Interpretar la información obtenida de los sensores	**C4**. Que la motocicleta pueda energizar los componentes
A7. Mandar alertas según sea necesario	**D3**. Refacciones fáciles de conseguir
B1. El sistema debe contar con sensores de proximidad	
B2. Se contará con una pantalla que muestre la información	
B3. Se contará con componentes que permitan la comunicación entre los sensores, y la pantalla	
C2. Que los componentes no ocupen demasiado espacio y colocarlos en lugares que no sean visibles a excepción de la pantalla	
E1. Optimizar el costo de diseño	

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 4. Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables.

	A8	A10	C1	C3	C4	D3	∑(+)	Ir (%)
A8		+	+	+	+	+	5	31.25
A10	-		-	-	-	-	0	0
C1	-	+		-	-	+	2	12.5
C3	-	+	+		+	+	4	25
C4	-	+	+	+		+	4	25
D3	-	+	-	-	-		1	6.25
						Total	16	100.00

Tabla 5. Orden de importancia de los requerimientos deseables.

Orden de importancia	REQUERIMIENTOS DESEABLES	∑(+)	Ir (%)
1	**A8**. Mostrar cuando el objeto ya está saliendo del rango y no es peligroso	5	31.25
2	**C3**. Que los componentes sean instalados de una manera fija	4	25
3	**C4**. Que la motocicleta pueda energizar los componentes	4	25
4	**C1**. Adaptación del sistema en cualquier motocicleta	2	12.25
5	**D3**. Refacciones fáciles de conseguir	1	6.25
6	**A10**. Realizar configuraciones en la pantalla	0	0
	Total	16	100.00

3.7 Metas de diseño

- Detección de objetos a determinados rangos (tres rangos establecidos).
- Identificar el tipo de riesgo.
- Alertar a la aplicación el tipo de riesgo.
- Un módulo Bluetooth.
- 4 sensores ultrasónicos.
- Un **Arduino**.
- Cables para la conexión en el circuito electrónico.
- Un dispositivo móvil.
- Una base para dispositivo móvil.
- Fácil mantenimiento.
- Refacciones fáciles de conseguir.
- Visualización de la información en pantalla.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.8 Análisis funcional del sistema

En el análisis funcional se detalla todas las funciones que el sistema debe cumplir, para esto se delimita la función global o principal del sistema y las sub-funciones que se tienen que realizar para que ésta se pueda llevar a cabo. La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño describe el papel a desempeñar del mismo, para lo cual se apoya de funciones de servicio que son todas aquellas acciones que serán realizadas por la máquina o sistema que se va a diseñar para dar solución a la necesidad planteada, y que pueden ser globales o de uso. La función global es monitorear objetos y consta de cinco sub-funciones las cuales deben realizarse para cumplir con la función global y los requerimientos establecidos por el cliente, como se muestra en la figura 5 el árbol de funciones.



Figura 5. Árbol de funciones del sistema.

3.9 Generación y evacuación de conceptos

Una vez establecido el análisis funcional se proponen soluciones para resolver cada función, esto mediante una tormenta de ideas, y así se generan los conceptos que darán forma al sistema o máquina a diseñar los conceptos para este proyecto se muestran en la tabla 6.

Una vez generadas las posibles soluciones a cada una de las funciones, se tiene que realizar una etapa de evaluación, para esto se utilizan tres filtros que ayudan a obtener el diseño que contemple de mejor manera las funciones y las expectativas del cliente.

El primer filtro es el filtro de factibilidad, donde las posibles soluciones se evalúan con base en que sean elementos que puedan cumplir con las funciones y no se contrapongan con algún requerimiento obligatorio dado por el cliente, como se muestra en la tabla 7.

Partiendo de la Tabla 7, se puede apreciar que algunas soluciones generadas en los conceptos B y C no cumplen de manera satisfactoria con este filtro, pero para no desechar los conceptos que si cumplieron se genera una mezcla entre los conceptos aceptables con este filtro y se forma un concepto AC; de igual manera las dos funciones que no fueron factibles del concepto A son sustituidas con las soluciones que si pasaron del concepto D obteniendo un nuevo concepto AD.

El segundo filtro es de disponibilidad tecnológica, en el cual se verifica que todas las soluciones a las funciones sean capaces de poderse diseñar o seleccionarse con base en los conocimientos teóricos o la maquinaria actual, de donde se puede apreciar en la tabla 8 que todos los conceptos cumplen de manera adecuada con este filtro.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 6. Generación de conceptos.

	Concepto			
Funciones:	**A**	**B**	**C**	**D**
Detectar objetos	Sensores ultrasónicos	Sensor infrarrojo	Sensores ultrasónicos	Sensor infrarrojo
Identificar el riesgo	Distancia	Distancia	Distancia	Distancia
Transmitir la información al dispositivo móvil	Enviar notificaciones por medio de ***Bluetooth***	Enviar notificaciones por medio de ***Wi-Fi***	Enviar notificaciones por medio de datos móviles	Enviar notificaciones por medio de ***Bluetooth***
Alertar el tipo de riesgo	Alerta sonora	Visualización de pantalla (colores)	Vibración	Visualización de pantalla (colores)
Visualizar la información	Aplicación Móvil	LCD	Pantallas electrónicas de LED	Aplicación Móvil
Medir la distancia entre el objeto y la moto	Tiempo de respuesta del sensor	Tiempo de respuesta del sensor	Tiempo de respuesta del sensor	Tiempo de respuesta del sensor
Conexión para comunicación	***Bluetooth***	Cables	***Wi-Fi***	***Bluetooth***
Permitir registro de usuario	Facebook	Google	Facebook	Google

Tabla 7. Primer filtro. Evaluación por factibilidad.

FUNCIONES	A	B	C	D
1. Detectar objetos	X	-	X	-
2. Identificar el riesgo	X	X	X	X
3. Transmitir la información al dispositivo móvil	X	-	-	X
4. Alertar el tipo de riesgo	-	X	-	X
5. Visualizar la información	-	X	-	X
6. Medir la distancia entre el objeto y la moto	X	X	X	X
7. Conexión para comunicación	X	-	-	X
8. Permitir registro de usuario	X	X	X	X
¿Viable?	NO	NO	NO	SI

Tabla 8. Segundo filtro. Evaluación por disponibilidad tecnológica.

FUNCIONES	AC	AD
1. Detectar objetos	X	X
2. Identificar el riesgo	X	X
3. Transmitir la información al dispositivo móvil	X	X
4. Alertar el tipo de riesgo	X	X
5. Visualizar la información	X	X
6. Medir la distancia entre el objeto y la moto	X	X
7. Conexión para comunicación	X	X
8. Permitir registro de usuario	X	X
¿Viable?	SI	SI

El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso en el concepto AC una de sus funciones no cumple con las expectativas del

ISBN: 978-607-9394-14-1.



cliente, lo cual conlleva a sustituir esa función por el elemento que se propone en AD que si cumplió con este filtro y así no desechar todo el concepto AC que se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Tercer filtro. Evaluación basada en los requerimientos del cliente.

FUNCIONES	AC	AD
1. Detectar objetos	X	X
2. Identificar el riesgo	X	X
3. Transmitir la información al dispositivo móvil	X	X
4. Alertar el tipo de riesgo	X	X
5. Visualizar la información	X	X
6. Medir la distancia entre el objeto y la moto	X	X
7. Conexión para comunicación	X	X
8. Permitir registro de usuario	X	X
¿Viable?	SI	SI

El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso en el concepto AC una de sus funciones no cumple con las expectativas del cliente, lo cual conlleva a sustituir esa función por el elemento que se propone en AD que si cumplió con este filtro y así no desechar todo el concepto A como se muestra en la tabla 9.

En la Tabla 10, se realizará una matriz de decisión, para la cual se necesitarán los requerimientos deseables y su calificación relativa, con lo que se obtendrá como resultado el concepto ganador, para esto se selecciona el concepto A como el concepto pivote, es decir el que servirá como punto de comparación, si un concepto cumple de mejor manera el requerimiento se colocará un signo (+), y si lo cumple de igual o menor forma se colocará un signo (-).

Tabla 10. Evaluación basada en matrices de decisión.

Requerimientos deseables	Conceptos		
	Calificación relativa	AC	AD
A8. Mostrar cuando el objeto ya está saliendo del rango y no es peligroso.	31.25	*	+
C3. Que los componentes sean instalados de una manera fija	25	*	-
C4. Que la motocicleta pueda energizar los componentes	25	*	-
C1. Adaptación del sistema en cualquier motocicleta	12.25	*	+
D3. Refacciones fáciles de conseguir	6.25	*	+
A10. Realizar configuraciones en la pantalla	0	*	+
∑+		*	4
Peso total	100	*	49.75
Mejor concepto (Ranking)		1	2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Resultados y diseño conceptual

Como resultado de la metodología se obtuvo el diseño conceptual del sistema, cuyas especificaciones son comparadas con el estado del arte, como se muestra en la tabla 11. Recordando que la fase de diseño a detalle corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución, basándose en la tecnología disponible se llegó al diseño siguiente:

Después de realizar los filtros correspondientes se obtiene como ganador el concepto AC, en el cual se tomó en cuenta que al visualizar la información solo se debe mostrar lo necesario para que el usuario pueda identificarla de inmediato, esta es recibida a partir del tiempo de respuesta de los sensores, de igual forma que se puede manejar la aplicación móvil de forma sencilla y clara, ya que esto caracteriza a todo sistema embebido, y no afecta drásticamente al diseño conceptual obtenido.

Tabla 11. Comparativo entre antecedentes con el sistema para monitoreo de objetos para motociclistas.

Sistema de prevención de accidentes	Ventaja	Desventaja
AEV (***Autobalanced Electric Vehicle***)	1. Este sistema de prevención que ya viene de fábrica con la motocicleta 2. Es casi seguro evitar un accidente gracias a sus giroscopios 3. Es más cómoda	1. El precio será muy elevado por causa de la tecnología y calidad que esta ofrece 2. No se puede adaptar a cualquier motocicleta 3. Por las desventajas anteriores no muchos conductores de motocicletas las pueden obtener y seguirían sin tener un sistema
Casco inteligente	1. Es adaptable con cualquier moto 2. Por sistema solo se compraría el Casco inteligente 3. El caso hace toda la tarea con una frecuencia hacia la moto	1. El precio elevado cuando se lance al mercado 2. Existen varias restricciones para su uso
Sistema para monitoreo de objetos para motociclistas	1. Adaptable a cualquier moto 2. Los sensores realizan la tarea junto con la pantalla que transmitirá la información al receptor 3. No es muy aparatoso, lo único que se visualizará físicamente será la pantalla	1. No tiene restricciones como el “Casco inteligente” 2. Al transmitir la información la decisión de esquivar los objetos solo seria del conductor

4.1 Simulación del diseño conceptual

De acuerdo con el diseño obtenido, se realizó una simulación en un ***software*** para el sistema de control digital, primero se muestra un diagrama del funcionamiento lógico de un sensor ultrasónico y después de ver su funcionalidad, el siguiente diagrama muestra los cuatro sensores a utilizar ya conectados a ***Arduino***, como se observa en las figuras 6 y 7 respectivamente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



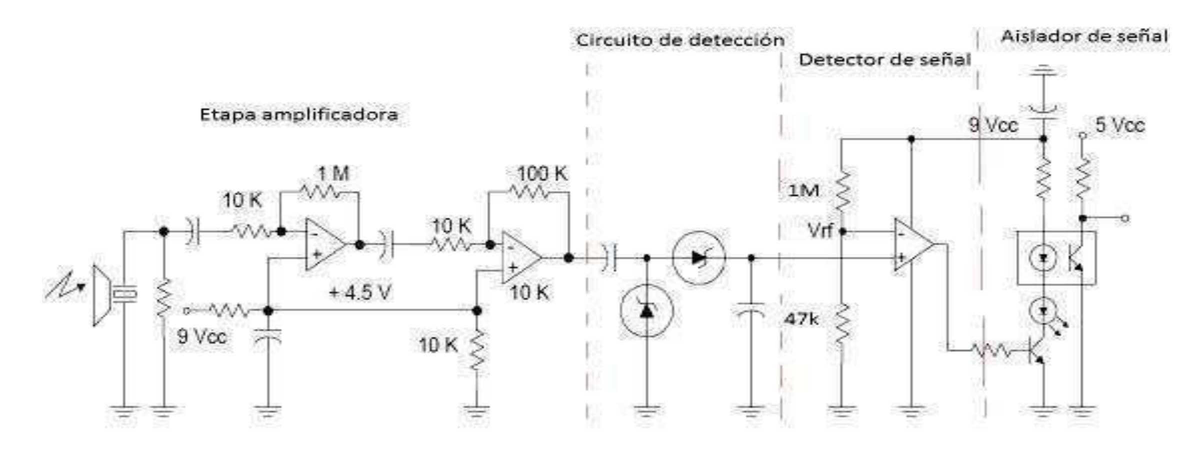


Figura 6. Diagrama lógico del sensor ultrasónico.

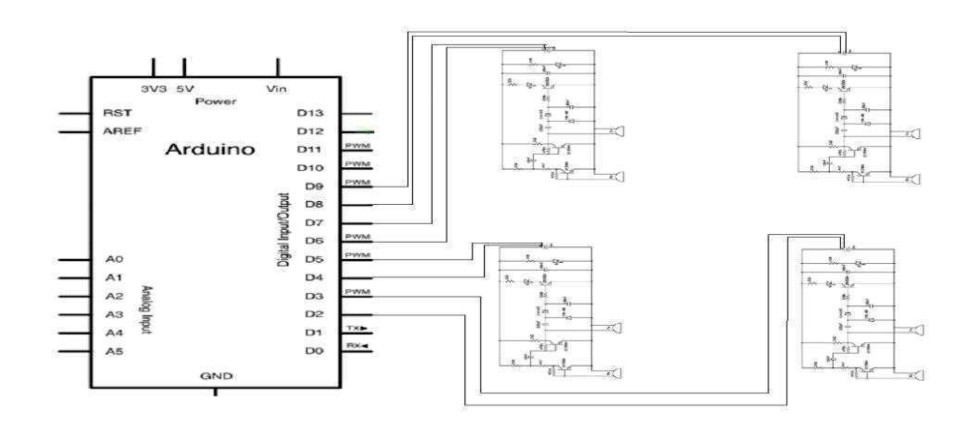


Figura 7. Diagrama esquemático del sistema con 4 sensores ultrasónicos.

Después de la realización del diagrama esquemático se realizó la simulación con los 4 sensores a utilizar, el **Arduino** y ***Bluetooth***, este último será la vía de comunicación entre el circuito físico y la aplicación móvil, como se muestra en la figura 8.

También se pueden emplear diferentes tecnologías en la medición de distancia para detectar proximidad con el motociclista como se muestran en la tabla 12 sin embargo, después de analizar todas las tecnologías que se podrían implementar en este proyecto, fue elegido el sensor ultrasónico por las siguientes características: bajo precio, calidad, tamaño adaptable para la instalación en la motocicleta, en comparación con algunas de las tecnologías mencionadas no se necesita medir una distancia grande, fácil y segura conexión con el ***Bluetooth*** para la comunicación con la aplicación móvil.

Para su funcionamiento se realizó la programación con ***Arduino*** que es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (***open-source***) basada en ***hardware*** y ***software*** flexibles y fáciles de usar. Arduino puede monitorear el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el ***Arduino Programming Language*** (basado en Wiring) y el ***Arduino Development Environment*** (basado en Processing) [14].

Para lograr obtener la distancia entre los objetos y la motocicleta se utilizaron sensores ultrasónicos, como su nombre lo indica, los sensores ultrasónicos miden la distancia mediante el uso de ondas ultrasónicas. El cabezal emite una onda ultrasónica y recibe la onda reflejada que retorna desde el objeto. Los sensores ultrasónicos miden la distancia al objeto contando el tiempo entre la emisión y la recepción como se muestra en la figura 9 [15].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



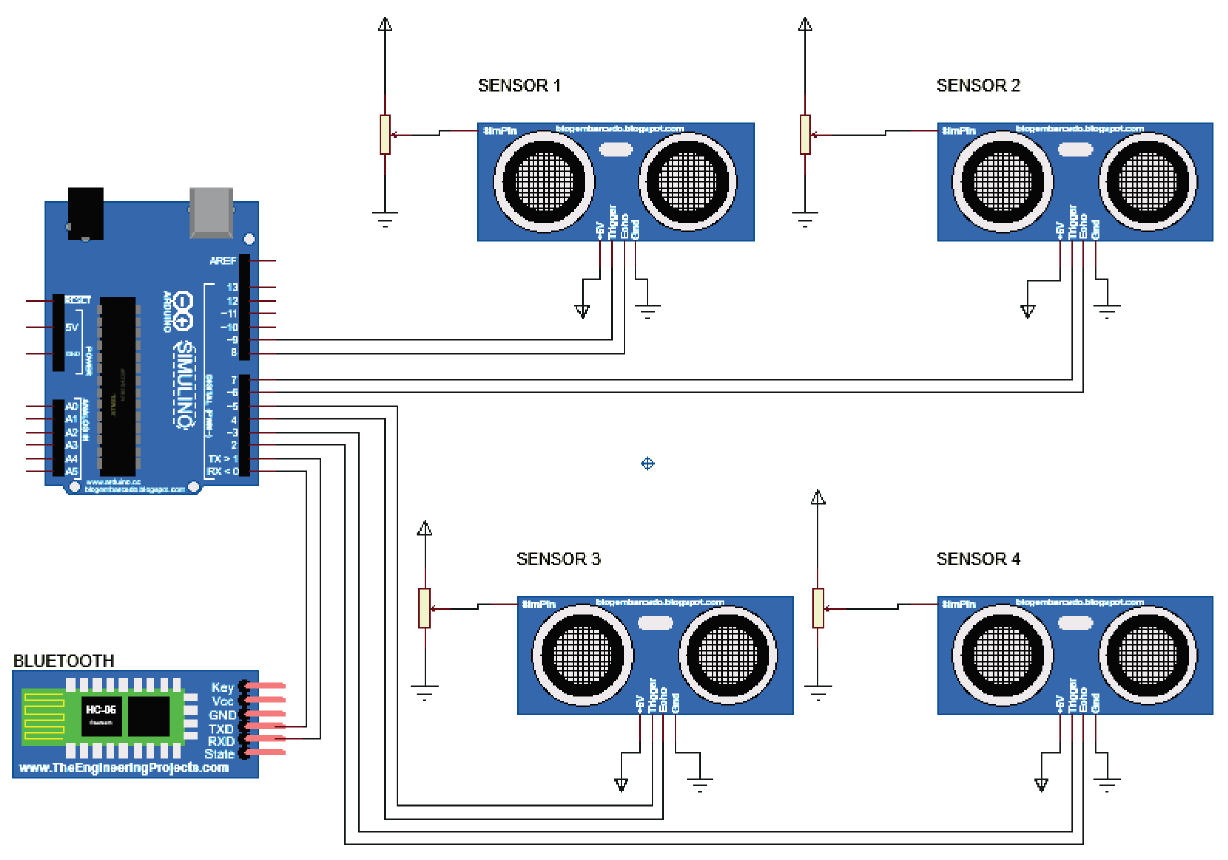


Figura 8. Simulación del circuito físico.

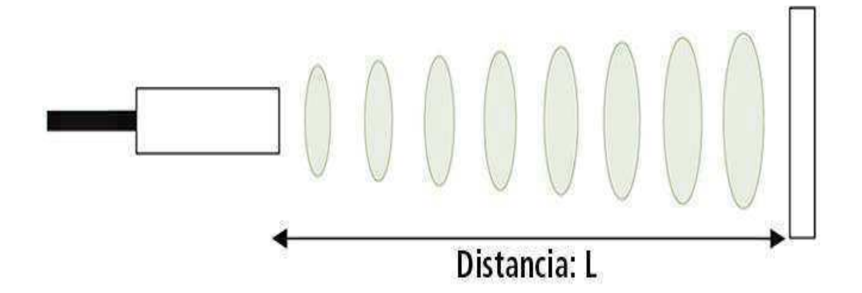


Figura 9. Funcionamiento de un sensor ultrasónico [15].

Características del Sensor de distancia ultrasónico:

- Alimentación de 5 volts
- Interfaz sencilla: Solamente 4 hilos Vcc, Trigger, Echo, GND
- Rango de medición:2 cm a 400 cm
- Corriente de alimentación: 15 mA
- Frecuencia del pulso: 40 Khz
- Apertura del pulso ultrasónico: 15º
- Señal de disparo: 10us
- Dimensiones del módulo: 45x20x15 mm

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 12. Tipos de tecnologías que pueden emplearse para medir distancia.

Tecnología	Concepto	Componente
Sensor Fotoeléctrico	Este sensor emite un haz de luz (visible o infrarrojo) desde su elemento emisor de luz. Tanto el emisor de luz como los elementos receptores están contenidos en una sola carcasa. El sensor recibe la luz reflejada desde el objeto [11]	
Medidor de distancia PCE-LRF 600	El medidor de distancia láser PCE-LRF 600 mide distancias hasta 800 m. Puede seleccionar las unidades de medición entre metros y yardas. Además de la medición de la distancia es posible detectar la velocidad con el medidor de distancia laser en km/h o m/s [12]	
Medidor de distancia DISTO D110.	El medidor de distancia Leica Disto D110 es un ***tester*** manejable y muy ergonómico para hacer mediciones de distancias y áreas. El medidor de distancia D110 mide hasta una longitud máxima de 60 m. Con esta instrumentación para distancia puede medir en diferentes unidades en metros, pies o pulgadas. Aplicaciones gratis para Smartphones y Tabletas [12]	
Láser para largas distancias WENGLOR o distanciómetro láser.	Sensor para medir larga distancia tecnología láser de alta precisión. Indica el sensor láser de larga distancia está orientado para la medida en medias y largas distancias, ya que su rango ajustable de medida puede ser desde 0.2m hasta 100.2m con ayuda de reflector. Estos rangos tan altos no implican imprecisión ya que se cuenta con resolución de 2 a 20mm [13]	
Sensores de distancia por ultrasonidos	Los sensores de distancia por ultrasonidos, son sensores compactos ideales para la medida de distancia o desplazamiento sobre materiales translúcidos, irregulares, pulidos, etc., aportando una salida proporcional al rango de distancia medido [13]	
Sensor de ultrasonidos con salida analógica	El sensor de ultrasonidos con salida analógica, permiten la medida sobre todo tipo de superficies en rangos medios. Gracias a su diseño compacto con carcasa roscada, permiten ser montados en cualquier tipo de aplicación, siempre y cuando se respeten las zonas de medida muerta, desde el borde de la carcasa hasta el inicio de rango [13]	

De acuerdo a la Tabla 6 se determinó ***Bluetooth*** como la vía de comunicación, ya que esta es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite la comunicación inalámbrica de datos entre dispositivos digitales, como un ordenador o una cámara digital. La tecnología inalámbrica ***Bluetooth*** funciona en un rango de aproximadamente de 10 metros, Lo habitual es establecer una conexión entre dos dispositivos, pero algunos dispositivos pueden conectarse simultáneamente a varios dispositivos, para este caso la comunicación será entre dos dispositivos, ***Arduino*** y el dispositivo móvil [16].

En continuidad de que la simulación realiza los requerimientos principales, se realizó la aplicación para el dispositivo móvil en el ***software*** *Android Studio*, verificando que la aplicación cumpla con las funciones al igual que el **SE** de control, y se puede observar el concepto ganador. Se muestra la pantalla principal del ***logeo*** del usuario el cual podrá ser realizado a través de una cuenta de *Google* o

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 25, pp. 305-320.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



mediante una cuenta *Facebook*, también se cuenta con la creación de cuenta ingresando un usuario y una contraseña, como se muestra en la figura 10 la pantalla principal de la App.



Figura 10. Pantalla principal de la aplicación.



Figura 11. Pantalla de inicio de alertas.

A partir de la pantalla de ***login***, se direcciona a la pantalla de inicio de alertas, en donde no se muestra peligro hasta que se detecte algún objeto, visualizándose con un fondo de pantalla blanco, como se muestra la pantalla de inicio de alertas en la figura 11.

La pantalla de inicio de alertas cambiará hasta que se detecte algún objeto en aproximación, según el rango, estos se clasificaron en: Riesgo bajo (verde), Riesgo moderado (amarillo) y Riesgo Alto (rojo), cada uno de los riesgos transmite la información de objeto, distancia y lado (izquierdo, derecho, adelante o atrás). Estos colores fueron elegidos porque los conductores ya se encuentran familiarizados con ellos por ser los mismos que utiliza el semáforo y por ser estándares de colores universales por su significado, así como se muestra en la figura 12 las tres diferentes alarmas [10].



Figura 12. Diferentes alarmas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



5. Conclusiones

Según la información investigada, los accidentes de tránsito causan 1.2 millones de defunciones anuales, de las cuales el 23% de todas estas muertes son de motociclistas [2], por ello implementar este sistema puede ayudar a los conductores en la toma de decisiones para evitar tener una colisión con otros objetos, esto pasará cuando los sensores puedan obtener dicha información y a través de la pantalla la puedan transmitir al conductor.

En el presente trabajo se desarrolló la metodología QFD, con el objetivo de obtener un diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos obligatorios del cliente y la mayoría de los deseables. Esta metodología conlleva a identificar la necesidad del cliente y sus requerimientos. Después, se clasifican los requerimientos en obligatorios y deseables, luego se procede a la traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería a fin de establecer metas de diseño, generar y evaluar conceptos adecuados para resolver la necesidad, esto a través de filtros de factibilidad, disponibilidad tecnológica, las necesidades del cliente y matrices de decisión, culminando con la determinación del concepto ganador, el cual debe dar solución a la necesidad planteada desde un principio, en este caso el diseño de un sistema de monitoreo para la detección de objetos próximos para motociclistas.

Una vez superada la etapa de diseño conceptual, se procede a realizar las simulaciones correspondientes del sistema embebido propuesto, en esta etapa se pueden corregir algunos aspectos de la etapa anterior, pero estas correcciones son mínimas, como en este caso el intercambio de una LCD (***Liquid Crystal Display***) por un dispositivo móvil. Se implementó un sistema embebido que monitorea objetos satisfactoriamente, proporcionando información como la distancia, el rango de peligro, etc. Detectar objetos, medir su distancia y clasificarlos por rangos es el resultado del tiempo de respuesta de los sensores, y para visualizar la información se utiliza una aplicación para dispositivos móviles, se alcanzó el objetivo de diseñar un sistema para los usuarios finales (motociclistas) utilizando las nuevas tecnologías, como los dispositivos móviles y **Arduino**, con lo cual se podrán monitorear los objetos que se aproximan, informar y que el usuario tenga una herramienta funcional que le permita tomar decisiones sensatas.

Referencias

[1] Hernández D.; Barrera D.; Álvarez; Benítez M.; Hernández G. *Diseño conceptual de un dispositivo electrónico de almacenamiento y conteo de monedas*. CIEES, p.p. 1-9, México, 2016.

[2] Organización Mundial de la Salud: *“Lesiones causadas por el tránsito”*. Consultado en marzo 21, 2018 en: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/es/

[3] PowerOne. Innovación: *“Así es la moto eléctrica que nunca se cae”*. Consultado en Marzo 21, 2018 en: https://brands.elconfidencial.com/motor/2017-02-23/vodafone-one-moto-electrica_1336523/

[4] TetaRekuai. *Socializan “casco inteligente” para prevenir accidentes de motos*. Consultado en Marzo 21, 2018 en: http://www.mspbs.gov.py/socializan-casco-inteligente-para-prevenir-accidentes-de-motos

[5] González M. *QFD, La Función de la calidad, Una guía práctica para escuchar la voz del cliente*. Mc. Graw Hill. México, 2000.

[6] Dym C. & Little P. *El proceso de diseño en ingeniería*. Limusa, México, 2009.

[7] Reyes F. y Cid J. *Arduino aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías*. Alfaomega, México, 2015.

[8] Gutiérrez A. *Microcontroladores PIC16, fundamentos y aplicaciones*. Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.

[9] Asociación Latinoamericana de QFD (*QFDLAT*), 2016. [En línea]. México, disponible en: http://www.qfdlat.com/_Que_es_el_QFD_/_que_es_el_qfd_.html [Acceso el día 18 de septiembre del 2016].

[10] *Circula seguro. Colores del semáforo.* Consultado en marzo 21, 2018 en: http://www.circulaseguro.com/por-que-los-semaforos-tienen-esos-colores/

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[11] *Guía de sensores para fábricas clasificados por principios Fundamentos del sensor*. *Detección basada en la "luz" ¿Qué es un sensor fotoeléctrico?* Consultado en mayo 08, 2018 en: https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/photoelectric/info/
[12] *PCE. Medidor de distancia.* Consultado en mayo 2017: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-distancia-kat_70052_1.htm
[13] *Sensing. Sensores de distancia posición desplazamiento sin contacto*. Consultado en mayo 05, 2018 en: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-distancia_36/Gu%C3%ADa-de-selecci%C3%B3n-de-sensores-de-distancia_185/Sensores-para-medir-distancia-sin-contacto-ni-rozamiento_262/
[14] *Arduino.* Consultado en mayo 05, 2018 en: http://arduino.cl/que-es-arduino/
[15] *Sensor de distancia ultrasónico*. Consultado en mayo 05, 2018 en: https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/
[16] *Tecnología inalámbrica Bluetooth*. Consultado en mayo 05, 2018 en: http://download.sony-europe.com/pub/manuals/html/MDR-1RBT/HG/ES/contents/02/01/01/01.html

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 321-336.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sensor Laser para Medir Desplazamientos en Marcos de Reacción de 200 Toneladas

De Gante García Marcos[1], Candia García Filiberto[2], Castillo Flores Martín[3], Ambrosio Lázaro Roberto C.[4] y Arizpe Islas Jorge[5]

[1, 4] Facultad de Ciencias de la Electrónica-BUAP
[2, 3] Facultad de Ingeniería-BUAP
[5] Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-UANL

Resumen

El presente trabajo se acota en el área del análisis estructural en ingeniería, donde se ha identificado que existe como debilidad la ausencia de material didáctico para su enseñanza. Por ello se ha determinado como indispensable desarrollar material didáctico que sea complemento de las pruebas destructivas de pandeo en columnas y deflexión en vigas. La propuesta son sensores de desarrollo propio, para una mayor y mejor confiabilidad de los resultados en pruebas destructivas. La propuesta se justifica por el alto costo que representa realizar pruebas de deflexión o pandeo mediante una instrumentación convencional con sensores LVDT, galgas extensiométricas y celdas de carga. El resultado ha sido un medidor de desplazamiento vertical que emplea el sensor laser VL53L0X, el cual se integra a un equipo de cómputo personal mediante el software Labview, integración que permite obtener una gráfica de desplazamiento de manera directa. La sistematización de la experimentación permite que el reporte final se incorpore en un cuaderno de prácticas que recopila y estructura la experiencia de enseñanza, para su aplicación en el aula mediante una estrategia constructivista-cognitiva asociada a la teoría del cálculo estructural.

Palabras clave: Medidor de desplazamiento, Sensor laser, Didáctica, Cálculo estructural, Pruebas destructivas.

1. Introducción

El presente trabajo inicia con el planteamiento de los antecedentes que ilustran que actualmente es necesario el desarrollo de estrategias de aprendizaje que conduzcan a la zona de desarrollo próximo del estudiante, propuesta por Vigotsky, para ello es indispensable que los apuntes que el docente proporcione a los estudiantes se complementen con material didáctico de desarrollo propio y se integren a actividades de enseñanza que vayan más lejos de las propuestas del constructivismo para promover un aprendizaje cognitivo. Puesto que la didáctica universitaria se construye y se transforma cuando existe conciencia sobre el estilo de aprender del enseñante, acompañado de una serie de procesos vinculantes con el estilo didáctico que identifica una práctica. Siendo imprescindible humanizar el acto pedagógico para que devele intenciones de cooperar, apoyar, comprender, motivar, y respetar la diversidad que emerge desde lo humano [1].

El material didáctico es desarrollado a partir del marco teórico que proporciona la didáctica, la cual rescata su sentido más profundo desde el planteamiento de Comenio en su obra máxima, donde se establece la necesidad inmediata de asociación entre la teoría con representaciones pragmáticas, permitiendo el desarrollo de estrategias didácticas que acompañen la enseñanza de las ciencias y la tecnología. La Didáctica Magna de Comenio, colocó al niño (estudiante) como centro del fenómeno educativo, haciendo que todo concurriera a su servicio: maestros, textos, aulas y métodos. A esta obra se debe la creación de la escuela popular, en la que todos tienen acceso a la educación: hombres y mujeres, pobres y ricos, párvulos y adultos, superdotados y atípicos. Aquí se implanta el método

ISBN: 978-607-9394-14-1.



activo (aprender haciendo) por el que el alumno crea su propio conocimiento con la memoria de la experiencia, antes que con la memoria de la palabra [2].

El objetivo principal en este trabajo es el desarrollo de un prototipo funcional que permita realizar la medición del desplazamiento trasversal en vigas o columnas. La metodología para la integración del sensor de desplazamiento se plantea a través del método científico-deductivo orientado a la investigación, que ha sido establecido como la mejor referencia para el desarrollo de la didáctica en las culturas; rusa, francesa, inglesa y americana. Lo anterior permitirá como objetivo específico contar con un elemento didáctico que se integra como parte de la instrumentación electrónica a marcos de reacción de 200 toneladas y complemente el estudio pragmático de elementos estructurales complejos como los marcos isostáticos e hiperestáticos.

En la escuela rusa se identifica que la mecatrónica (llamada en ese entonces politécnica) ya ha sido identificada como un elemento de alta relevancia para el desarrollo tecnológico. Los educadores soviéticos han investigado a fondo los fundamentos científicos del contenido de la enseñanza politécnica (mecatrónica). Se han analizado las actividades de los trabajadores que ejercen las ocupaciones más estimulantes y se han utilizado los resultados obtenidos para construir un modelo ideal de la persona politécnicamente (mecatronicamente) formada. En el proceso de producción hay cinco grupos de principios globales que son comunes a toda la industria moderna y que tienen carácter universal, a saber: los principios de la ingeniería mecánica, la electrotecnia, la automatización, la organización y la economía. La enseñanza politécnica (mecatrónica) se imparte mediante el estudio de los fundamentos de la ciencia, la instrucción en las artes manuales, las diversas actividades extraescolares y el trabajo socialmente útil que realizan los alumnos [3].

El desarrollo fue experimental en la fase de integración de hardware y software, pues se adecuaron diversas tecnologías, para favorecer un bajo costo del sensor. Se ajustaron las señales de salida para adquirir mediante el software Labview las mismas y representarlas mediante gráficas. Que favorecen la interpretación de los resultados, tanto para la enseñanza, el aprendizaje y la investigación formal sobre todo cuando se asocian con la enseñanza tradicional como el método “Socrático”, para como docente ser plural en la elaboración de apuntes, prácticas y desarrollo tecnológico, sin abusar del constructivismo como la receta para la adquisición de competencias.

Durante le desarrollo se ha privilegiada el uso de la didáctica de las ciencias, considerada como ámbito de investigación, es el estudio de los procesos de elaboración, transmisión y asimilación de los conocimientos científicos. Con carácter general, se pone de manifiesto que el constructivismo actualmente alimenta una doxa pedagógica que, como tal, tiene sus límites. Aunque se sabe que los conocimientos que denotan un proceso de construcción modifican en profundidad el sistema cognitivo de los individuos, es muy perjudicial minimizar la importancia de otras formas de aprendizaje…Cuando hemos trabajado en investigación con enfoques constructivistas, ha sido esencialmente para distinguir lo que implican, tanto desde el punto de vista de la organización de la enseñanza (situaciones, problemas, formas de trabajo, modalidades de intervención del profesor) como de las actividades cognitivas de los alumnos en los planos individual y colectivo. Por lo tanto, es de temer que, sin una reforma profunda de la enseñanza de las ciencias, la doxa constructivista no sea viable y se abandone, descalificando así a los constructivismos psicológico y epistemológico [4].

En la conclusión se anticipa que el proyecto es de alta viabilidad, en base a las pruebas realizadas las cuales determinan que cuenta con alta precisión y exactitud en un rango milimétrico. Como trabajo futuro se establece el requerimiento de una prueba comparada entre el sensor desarrollado y un sensor LVDT utilizado en la instrumentación convencional con un alto costo para los marcos de reacción de 200 toneladas.

2. Antecedentes

La necesidad de fortalecer el proceso cognitivo de los alumnos demanda la constante utilización, actualización o innovación de estrategias de enseñanza-aprendizaje (E-A) ya que es importante que el estudiante comprenda la necesidad de contar con apoyos didácticos para reforzar



su aprendizaje significativo, sobre todo cuando se promueve el aprendizaje basado en proyectos (ABP) el cual demanda que el alumno sea autodidacta y muestre una actitud propositiva fundada en el asombro y el análisis de las partes que forman un sistema.

A pesar del gran valor educativo que tiene la instrucción basada en el análisis de problemas para dotar al alumno de un saber conscientemente asimilado y desarrollar su independencia cognoscitiva, los educadores soviéticos no la aplican a todas las situaciones ni la oponen a los métodos pedagógicos tradicionales, tales como el método de explicación e ilustración o el método reproductivo. Todos los métodos son necesarios para sus tareas educativas específicas y ningún otro método puede sustituirlos. Lo ideal debería ser poder combinarlos armoniosamente [3]. El desempeño del individuo en cualquier campo de la vida requiere de la utilización de determinadas habilidades, destrezas, capacidades, etcétera. La UNESCO (1988) menciona que el aprendizaje a lo largo de toda la vida es un proceso inherente a la formación humana. Pero no es sólo una opción de carácter personal, dado el impacto que tiene en tres niveles de desarrollo:

- Personal y cultural, que es el que da sentido a la existencia de cada individuo;
- Social, que se refiere al lugar ocupado en una comunidad, ciudadanía, participación política y sociabilidad;
- Profesional, que guarda relación con el empleo no precario y de calidad, vínculo con la producción, satisfacción profesional y el bienestar material [5].

Por lo anterior las Instituciones de Educación Superior en Ingeniería deben promover una formación integral que debe pensarse como un proceso dialéctico que refleje la necesidad histórica de la educación y la necesidad de agrupar los aspectos esenciales de la enseñanza pertenecientes a varias disciplinas que se interrelacionan, conformando una nueva unidad de síntesis interdisciplinaria que implica un salto de calidad [6]. Respondiendo así a los problemas causados por el aumento extraordinario de la información científica y de manera que permita a los estudiantes un aprendizaje eficaz y eficiente.

Vygotsky considera que las funciones psicológicas superiores pueden ser: naturales y culturales, no obstante, lo verdaderamente determinante es la condición social. La distinción entre ambas está en el grado y el modo de abstracción y descontextualización de los instrumentos semióticos que se emplean. De esta forma se crea lo que él llamó zona de desarrollo próximo (ZDP). Para Vygotsky, "el aprendizaje es una forma de apropiación de la herencia cultural disponible, no sólo es un proceso individual de asimilación; es el origen y el motor del aprendizaje" [7].

Para recrear una ZDP, es necesario contar con los medios didácticos adecuados, para ello los docentes pueden compilar todo el material a utilizar en una materia dentro de los apuntes de su clase. De igual forma, los estudiantes universitarios necesitan formas de retener la información obtenida fuera y dentro de las aulas; una de ellas es mediante los apuntes. Dejando a un lado la concepción de apuntes como los dictados que realiza el profesor, los apuntes se pueden considerar como el material que el profesor brinda dentro y fuera del salón de clase, mismo que el alumno trabajo o revisa.

Las investigaciones aplicadas llevan a conclusiones y a recomendaciones de orden práctico que pueden utilizarse en la labor pedagógica cotidiana. Sin embargo, para su aplicación práctica, el material más específico son los estudios que planean en detalle el proceso didáctico y educativo, proporcionando a los profesores una ayuda directa en su labor cotidiana con los alumnos [3].

Con apoyo de material didáctico integrador, el estudiante puede analizar la información previamente a una clase o recordarla más tarde mediante una práctica o experimentación, ya que muchas veces resulta difícil memorizar la información presentada, además de que para alcanzar una memoria a largo plazo es necesario repasar nuevos conocimientos. La investigación en didáctica de las ciencias está mostrando que “los estudiantes desarrollan mejor su comprensión conceptual y aprenden más acerca de la naturaleza de la ciencia cuando participan en investigaciones científicas, con tal de que haya suficientes oportunidades y apoyo para la reflexión” (Hodson, 1992), citado en [8].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Marco teórico

Para la revisión documental se realizó un recorrido de las publicaciones realizadas por la UNESCO con respecto al tema de la didáctica, para rescatar la percepción de los promotores de su uso y empleo en el aula. Siendo satisfactorio encontrar argumentos teóricos con suficiente vigencia y una perspectiva no saturada en el uso de las TIC´s. que refleja el fin último de los educadores, ya sean maestros de profesión o maestros por casualidad.

Con respecto a la didáctica, desde épocas pasadas se han realizado esfuerzos para cumplir una de las tareas más importantes del perfeccionamiento de la educación: reflejar en ésta de la manera más completa y fiel los adelantos modernos de la ciencia, la técnica, la cultura, etc.; lo que significa elevar el nivel teórico de las disciplinas escolares. Para ello tiene especial importancia aplicar los conocimientos teóricos ya adquiridos al estudio de las secciones sucesivas del curso correspondiente y establecer relaciones entre materias conexas. Esto exige determinar en cada curso de la enseñanza escolar las ideas fundamentales en torno a las cuales se dispone el contenido de todo el curso [3].

Como hallazgo se determinó que, en la escuela didáctica rusa como la escuela didáctica americana, se hace principal énfasis en el desarrollo del material didáctico para su uso en una didáctica orientada al método científico deductivo que promueve la investigación (heurístico). Se privilegia el actuar independiente y un contacto directo con la infraestructura productiva. Siempre que exista la regulación de las condiciones para reproducir el proceso de reflexión y asimilación gradual en relación con la edad biológica del estudiante.

El método heurístico estimula al estudiante a desarrollar el comportamiento de un investigador experimentado. Capacita al estudiante para tomar iniciativas, fomenta la confianza en sí mismo, el sano juicio y, por ende, las aptitudes manipulativas mediante el contacto directo con aparatos y materiales. Cada lección debe exponerse en forma de investigación con el estudiante colocado en la postura del descubridor inicial. En el siglo xx la figura principal del descubrimiento considerado como método docente fue John Dewey, que se interesó, sobre todo, por el pensamiento reflexivo y gradual en la mente del estudiante que se esfuerza por descubrir lo que debe aprender. Bruner reivindica también el hecho de que los estudiantes, al descubrir las regularidades de las relaciones y analogías antes desconocidas entre las ideas, tienen más confianza en sus propias capacidades, mientras el tema de investigación se les hace más comprensible, se asegura la transferencia adecuada de conocimientos y se reduce la laguna entre el conocimiento elemental y el avanzado. Del mismo modo, la comprensión de la estructura derivada del descubrimiento permite al estudiante "aumentar su capacidad de intuición ante los problemas" [9].

Con la suficiencia de una experiencia personal enriquecida con la enseñanza a nivel superior, durante la revisión documental se observó que, al inicio para Comenio, como más tarde para Rousseau, el hombre es perfectible indefinidamente y, en consecuencia, la educación puede contribuir a su desarrollo. Quien desee penetrar en el alma de sus discípulos y ganar su confianza tiene una posibilidad: el amor. La observación de la naturaleza y el respeto de sus leyes es el único método eficaz [10].

Por lo tanto, sumado la estricta rigidez del método, el dominio de la técnica y la asociación del reconocimiento del estudiante como ser humano (como se dicta en el constructivismo), la didáctica debe incluir el sentido de la adaptación y evolución cognitiva de manera que sea posible contar con alternativas de mayor impacto en el proceso de E-A. Piaget coloco varias piedras angulares en la investigación didáctica: las ideas de adaptación, de desequilibración y reequilibracion, un gran número de hechos relativos a la conservación de las cantidades, la representación del espacio y la formación de los conceptos matemáticos y físicos, etc. [10]. Promueve el esquema, que es el lugar psicológico por excelencia de la adaptación. Colocar situaciones susceptibles de provocar la evolución adaptativa de la actividad y de los conocimientos de los alumnos…siendo el conocimiento un proceso de adaptación [11].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Análisis estructural

La ingeniería estructural es la rama de la ingeniería que trata la concepción, el diseño y la construcción de las estructuras, basándose fundamentalmente en criterios de funcionalidad, seguridad, economía y estética (figura 1). Se entiende por estructura aquella parte de la construcción que soporta el conjunto, es decir, que es capaz de resistir las acciones que actúan sobre ella -peso propio, sobrecarga de uso, viento, movimientos sísmicos, etc.-.

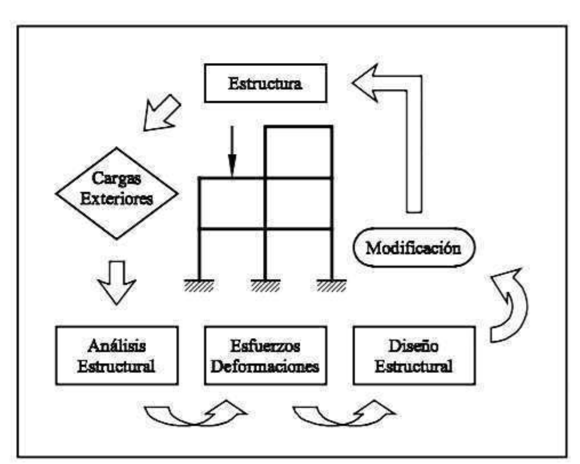


Figura 1. Secuencia operacional de un proyecto estructural.

Como las corrientes pedagógicas actuales de tipo constructivista se centran en el estudiante, quien debe construir su propio cuerpo de conocimientos de una determinada materia con la ayuda del profesor. Con este fin, los entornos de experimentación constituyen una herramienta científica de gran potencial para la transmisión de conocimientos a través de modelos basados en la propia experiencia del estudiante. Con tales modelos se pueden representar fenómenos físicos con el necesario rigor y realismo para que puedan ser identificados de forma clara con situaciones reales. De este modo, el conocimiento científico que subyace bajo cada situación modelizada queda lo suficientemente recalcado, permitiendo una transición simple y directa entre el concepto y el modelo cognitivo [13].

Las materias relacionadas con el análisis y el diseño de estructuras son de obligatoria presencia para el grado de licenciatura y maestría, en la enseñanza de las técnicas actuales de construcción de estructuras civiles y mecánicas. Estas materias tecnológicas incluyen a la vez, diversas asignaturas encaminadas a estudiar el comportamiento estructural desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo, siendo este último el más característico de tales enseñanzas (figura 2). De este modo se justifica la experimentación de elementos estructurales como vigas, columnas y marcos, ya que están en total sintonía con los contenidos de una asignatura tecnológica como mecánica de sólidos o análisis matricial, que por lo general marca el inicio del recorrido curricular en materia de cálculo de estructuras [13].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 321-336.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



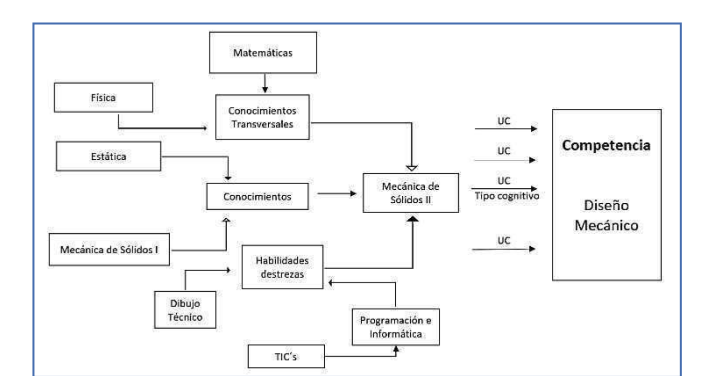


Figura 2. Integración de asignaturas para desarrollar una secuencia didáctica.

4.1 Analisis de vigas

En ingeniería y arquitectura se denomina viga a un elemento estructural lineal que trabaja principalmente a flexión. En las vigas, la longitud predomina sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal. Se caracteriza por tener una relación geométrica donde la longitud es mayor a 20 veces el diámetro (L>20D) ver figura 1. Para su diseño estructural es necesario que la déflexion no sobrepase los calores permisibles por los codigos de construccion como las Normas Técnicas de Construcción del Distrito Federal, México. Entre las principales configuraciones de diseño se encuentran la viga catiliver y la simplemente apoyada, a continuacion se ilustra el procedimiento analitico para determinar la deflexión en una viga simplemente apoyada mediante la ecuación 1 y el angulo de giro mediante la ecuación 2.

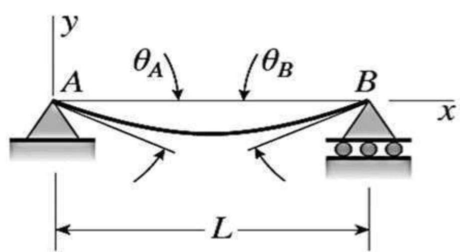


Figura 3.- Representación gráfica de la deflexión y pendiente de una viga simplemente apoyada.

La terminología y simbología empleada para la deflexión es la siguiente:

$v =$ Deflexión de la viga en la dirección y (positiva hacia arriba)
$v' = \frac{dv}{dx} =$ Pendiente de la curva de deflexión
$\delta_C = -v(L/2) =$ Deflexión en el punto medio C de la viga positivo hacia abajo
$X_1 =$ Distancia del apoyo A al punto de deflexión máxima
$\delta_{max} = -v_{max} =$ Deflexión máxima (positiva hacia abajo)
$\theta_A = -v'(0) =$ Ángulo de rotación en el extremo izquierdo de la viga (positivo en el sentido de las manecillas del reloj).
$\theta_B = -v'(L) =$ Ángulo de rotación en el extremo derecho de la viga (positivo en el sentido de las manecillas del reloj).
$EI =$ Rigidez constante para toda la viga.

Datos para determinar la deflexión y giro:

E = Módulo de Elasticidad	206 000 N/mm^2
L = Longitud	1 000 mm
P = Carga puntual	9 800 N
I = Momento de inercia	8 333 333.33 mm^4
y = Deflexión permitida	0.002 mm

Sustituyendo valores:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \qquad (1)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\delta_{max} = \frac{9800 * 1000^3}{48 * 206000 * 8333333.33} = 0.1189\, mm$$

$$\theta_B = \frac{PL^2}{16EI} \qquad (2)$$

$$\theta_B = \frac{9800 * 1000^2}{16 * 206000 * 8333333.33} = 0.000356\, rad = 0.02039°$$

4.2 Detección de distancia

El dispositivo medidor de distancia opera vía transmisión de un pulso corto de alta potencia con respecto a un objeto. Un fotodetector en el sistema receptor identifica la luz reflejada del objeto, conociendo el intervalo de tiempo requerido por la señal para viajar del transmisor al objeto y de regreso al receptor, es posible calcular la distancia del sistema rastreador de objetos. La distancia se calcula por la ecuación 3, con la mitad del intervalo de tiempo entre el pulso de luz emitido y el pulso dispersado de regreso, por la velocidad de la luz:

$$d = \frac{c \times T}{2} \qquad (3)$$

$Donde$:
$d = distancia$
$c = velocidad\ de\ la\ luz$
$T = tiempo$

El sistema óptico transmisor actúa como una antena para reducir el ángulo de divergencia del haz transmitido y para dirigir el haz al objeto. El sistema receptor óptico actúa en su lugar como una antena para colectar parte del haz reflejado y concentrarlo "enfocarlo" al detector (figura 3).

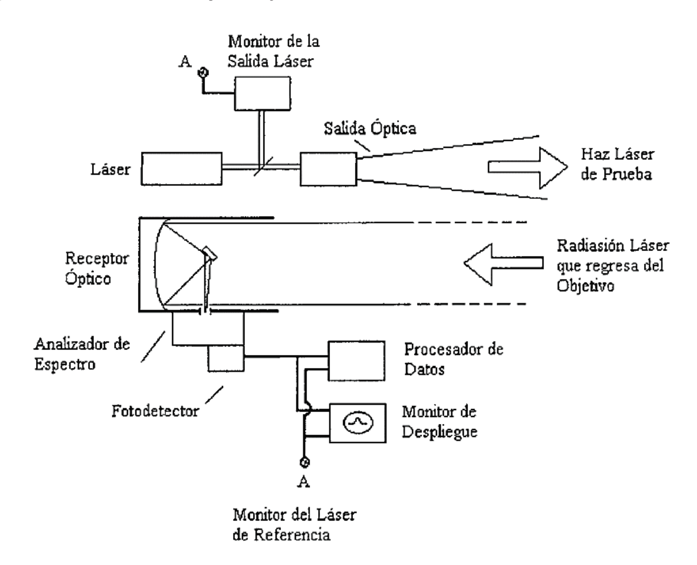


Figura .3- Diagrama de esquemático de un dispositivo de detección de distancia.

El diseño electrónico que mide el intervalo de tiempo desde que la señal láser abandona el transmisor hasta que es recibida por el detector y convierte el resultado en una distancia recorrida se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



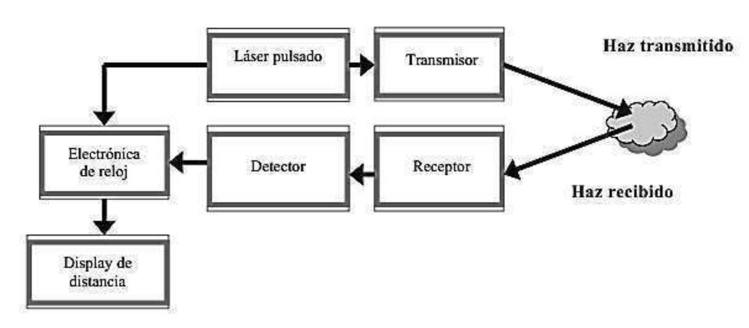


Figura 4.- Diagrama de bloques de un dispositivo medidor de distancia.

5. Metodología

El actual desarrollo (sensor de distancia) es parte del objetivo general de un proyecto de mayor alcance, el cual consiste en elaborar un cuaderno de prácticas de cálculo de elementos estructurales como los marcos isostáticos e hiperestáticos y su material didáctico. Siendo los objetivos específicos:

1) Fabricar material didáctico por medio del prototipado rápido.
2) Comparar datos analítico-experimentales, por medio de pruebas destructivas.
3) Redacción de secuencias didácticas para el cálculo de elementos estructurales como marcos isostáticos e hiperestáticos.

Respecto a la planeación del trabajo actual, este incluye la investigación intensiva y presentación de propuestas de solución a un problema de cálculo estructural (desplazamiento de elementos estructurales ante condiciones de restricción y carga) cuyas condiciones puedan ser reproducibles mediante la experimentación física (pruebas destructivas) y posteriormente reproducibles mediante el prototipado rápido como material didáctico, de acuerdo con el procedimiento, que consta de un desarrollo general y un subprocedimiento (figuras 5 y 6).

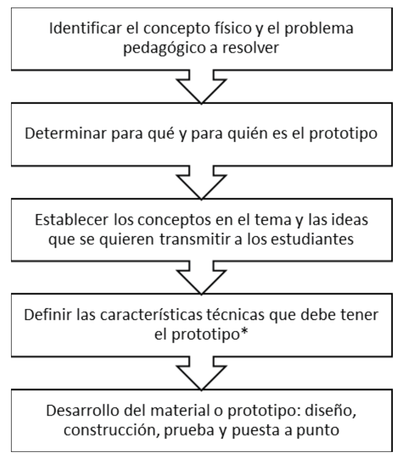


Figura 5.- Procedimiento general para el desarrollo y fabricación de un sensor de desplazamiento, considerado como prototipo didáctico.



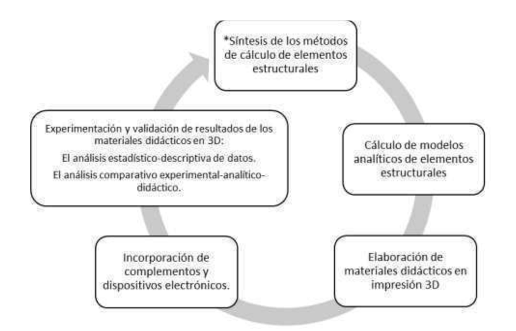


Figura 6.- Subprocedimiento para desarrollar y fabricar un sensor de desplazamiento.

6. Desarrollo

Se realizó un sistema de adquisición de datos para sensores de carga, distancia y presión, así como una interfaz en instrumento virtual con LabVIEW, para ello se utilizó una DAQ National Instruments modelo USB 6009 (figura 7), para hacer la interfaz hardware-software, se incluyó un Arduino modelo UNO para realizar acondicionamiento de las señales obtenidas por los sensores y el software de National Instruments LabVIEW en el cual se realizó la interfaz en un instrumento virtual.



Figura 7. DAQ USB 6009 de NI.

Los sensores utilizados fueron los siguientes:
Sensor de presión MPXV7002 en un módulo CJMCU-36 (figura 8). Es un transductor piezoresistivo de silicio, diseñado para realizar una comparación entre dos presiones, una de referencia y la otra que se desea medir. Como un transductor es un dispositivo que transforma una magnitud física que puede ser de naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, etc. en energía eléctrica pero siempre dependiente de la magnitud que se está recibiendo. Donde la piezorresistividad es la propiedad de algunos materiales conductores y semiconductores, cuya resistencia eléctrica cambia cuando se los somete a un esfuerzo o estrés mecánico (tracción o compresión) que los deforma.

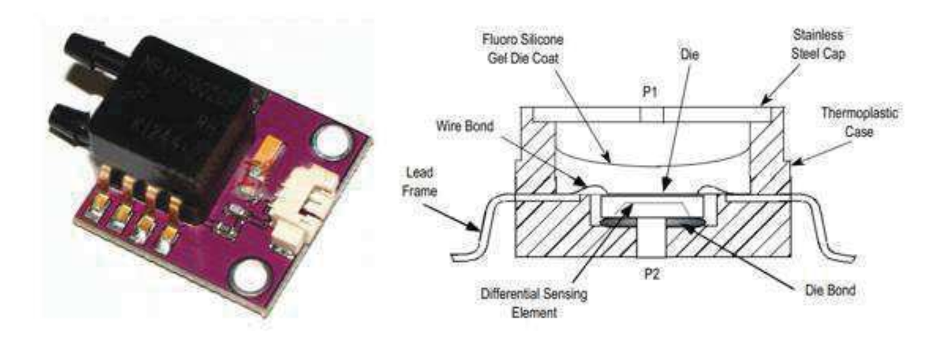


Figura 8. Módulo CJMCU-36 y composición interna del sensor MPXV7002.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una celda de carga es un módulo de detección de fuerza (figura 9), que incluye una estructura metálica de aluminio con elementos llamados extensómetros montados en ubicaciones precisas de la estructura. Las celdas de carga están diseñadas para medir una fuerza específica e ignorar otras fuerzas que se están aplicando. La señal eléctrica emitida por la celda de carga es muy pequeña y requiere una amplificación especializada, dicha amplificación fue realizada con un módulo HX711. Las celdas de carga están diseñadas para medir la fuerza en una dirección. A menudo se mide la fuerza en otras direcciones, pero la sensibilidad del sensor es diferente, ya que las partes de la celda de carga que funcionan bajo compresión ahora están en tensión, y viceversa.

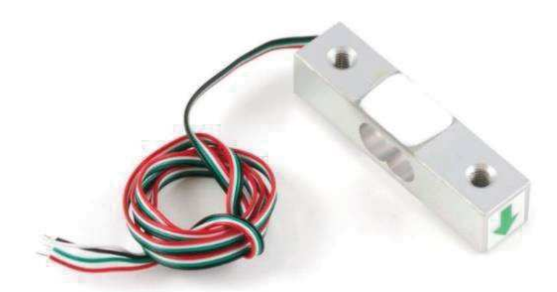


Figura 9. Celda de Carga CZL-A de 10 kg.

La celda de carga de punto único se utiliza comúnmente en escalas pequeñas de joyería y básculas de cocina. Se monta atornillando el extremo de la celda de carga donde se unen los cables y aplicando fuerza en el otro extremo en la dirección de la flecha. El lugar donde se aplica la fuerza no es crítico, ya que esta celda de carga mide un efecto de cizallamiento del haz, no la flexión de este. Si monta una plataforma pequeña en la celda de carga, como se haría en una escala pequeña, esta celda de carga proporciona lecturas precisas independientemente de la posición de la carga en la plataforma.

El módulo HX711 es un convertidor analógico-digital de 24 bits (figura 10) diseñado para celdas de carga y aplicaciones de control industrial. El multiplexor de entrada selecciona la entrada diferencial del canal A o B para bajar el nivel del amplificador de ganancia programable (PGA). El canal A puede programarse con una ganancia de 128 o 64 bits, correspondiente a un voltaje de entrada diferencial en escala completa de ± 2 0mV o ± 40 mV respectivamente, cuando se conecta una fuente de 5V al pin de suministro de potencia analógico AVDD. El canal B tiene una ganancia fija de 32 bits. El regulador de suministro de energía Onchip elimina la necesidad de un regulador de suministro externo para proporcionar alimentación analógica para el ADC y el sensor. La entrada del reloj es flexible. Puede ser desde una fuente de reloj externa, un cristal o el oscilador en chip que no requiere ningún componente externo. No se necesita programación para los registros internos. Todos los controles del HX711 son a través de los pines.

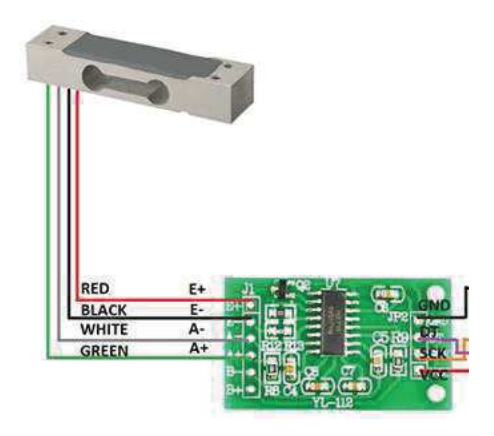


Figura 10. Celda de carga CZL-A y módulo HX711 mostrando la conexión con la celda.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 321-336.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sensor de distancia VL53L0X en módulo CJMCU 530 (figura 11). Es parte de la nueva generación de sensores de distancia por tiempo de vuelo (ToF: Time of Flight). Posee un empaque ultra pequeño, ofrece mediciones exactas sin importar la superficie reflectante, con un rango de medición de hasta 2 m. El principio de funcionamiento de los sensores de distancia por tiempo de vuelo es similar al de los sensores ultrasonido: El sensor posee un emisor laser que cada cierto tiempo emite un haz de luz, al encontrarse con un objeto la luz es reflejada, el sensor se encarga de medir el tiempo entre la emisión y la detección de la luz y como la velocidad de la luz es un valor conocido entonces se puede calcular la distancia al objeto con el tiempo de vuelo. El emisor laser del VL53L0X es de tipo VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser) y es totalmente invisible al ojo humano, además posee óptica con filtros anti-infrarrojo.

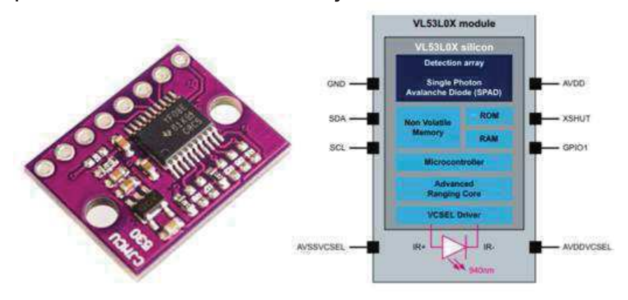


Figura 11. Sensor de distancia VL53L0X en módulo CJMCU 530 y esquema interno del chip.

6.1 Experimentación

La celda de carga y el sensor de distancia se conectaron al Arduino (figura 12), para el procesamiento de señales y del Arduino se realizó una conexión a la DAQ, mientras que el sensor de presión se conectó directamente a la DAQ. El módulo HX711 se conecta a 5V y tierra en sus pines 1 y 2 utilizando los pines de energía del Arduino, los pines CLK y DAT se conectan a los pines digitales 2 y 3 respectivamente. El módulo CJMCU 530 se conecta a 5V y tierra en sus pines 1 y 2 utilizado los pines de energía de Arduino los pines SDA y SCL se conectan a los pines analógicos 4 y 5 respectivamente, el resto de los pines del módulo no se conectan.

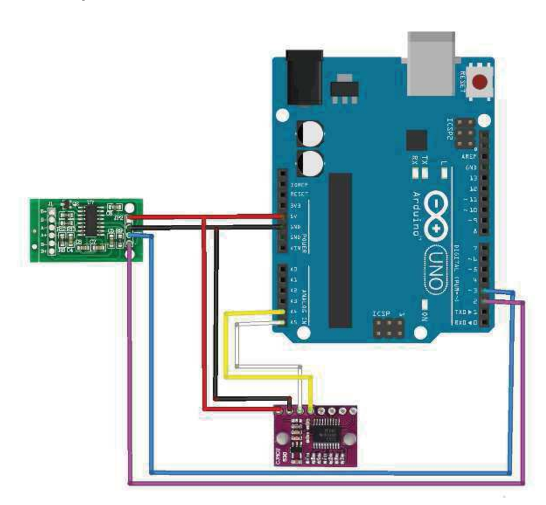


Figura 12. Diagrama de conexión HX711 y CJMCU 530 con Arduino Uno.

El módulo CJMCU 36 (figura 13), se conecta a 5V y tierra, utilizando los pines de energía del Arduino y el pin ANALOG se conecta al pin ai0 de la DAQ. Cabe resaltar que las tierras de ambos dispositivos deben ser comunes.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



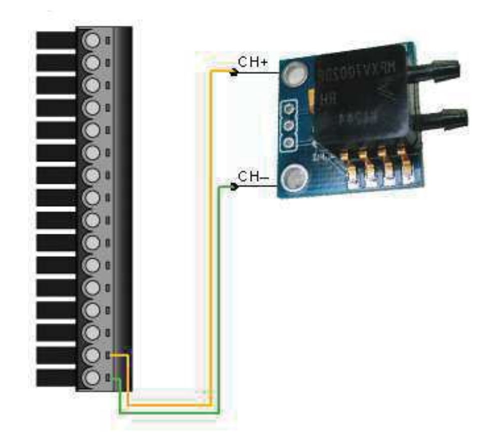


Figura 13. Diagrama de conexión CJMCU 36 a la NI DAQ.

El sistema obtiene las señales analógicas de los sensores, estas señales analógicas son ingresadas en el Arduino mediante sus pines a los ADC (Analog to Digital Converter) y en este dispositivo se realiza un acondicionamiento, se filtran de ruidos y se amplifican a un valor reconocible por la DAQ, una vez hecho este proceso, las tres señales ya acondicionadas se mandan a la DAQ para su lectura en el software LabVIEW, el código de programación del Arduino se muestra a continuación (en él se hacen uso de las librerías proporcionadas por los fabricantes de los módulos y únicamente se despliega la información requerida por el puerto serial en este caso USB por medio de operaciones aritméticas).

```
// Arduino pin 2 -> HX711 CLK
// 3 -> DAT
// 5V -> VCC
// GND -> GND
//
// The HX711 board can be powered from 2.7V to 5V so the Arduino 5V power should be fine.

#include "HX711.h"
#include "math.h"
#include "Adafruit_VL53L0X.h"
#define calibration_factor -1050 //This value is obtained using the SparkFun_HX711_Calibration sketch

#define DOUT  3
#define CLK  2
//An SDA04 y SCL05 dist
HX711 scale(DOUT, CLK);
Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();
float nilai;
float p;
float dist;
const int analogOutPin9 = 9;
const int analogOutPin10 = 10;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //Serial.println("HX711 scale demo");
  scale.set_scale(calibration_factor); //This value is obtained by using the SparkFun_HX711_Calibration sketch
  scale.tare();  //Assuming there is no weight on the scale at start up, reset the scale to 0
  Serial.println("Readings:");
   // Serial.println("VL53L0X test");
  if (!lox.begin()) {
    Serial.println(F("Error al iniciar VL53L0X"));
    while(1);
  }
}
void loop() {
  VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
    //  Serial.print("Leyendo sensor... ");
  lox.rangingTest(&measure, false); // si se pasa true como parametro, muestra por puerto serie datos de debug
   dist=measure.RangeMilliMeter;
    if (measure.RangeStatus != 4)
  {
   Serial.print("Distancia (mm): ");
   Serial.println(measure.RangeMilliMeter);
  }
  else
  {
    Serial.println("  Fuera de rango ");
  }
analogWrite(analogOutPin9, ((dist*255)/1100));
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 1); //scale.get_units() returns a float
```

ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
  Serial.print(" grm"); //You can change this to kg but you'll need to refactor the calibration_factor
  Serial.println();
 //Serial.print(scale.get_units(), 1); //scale.get_units() returns a float
p= scale.get_units();
//pembulatan
 float a=p;
    nilai = floor(a);
    if (a-nilai <= 0.5){
      nilai=floor(a);
    }else {
      nilai = ceil(a);
    }
   int gram=nilai;
analogWrite(analogOutPin10, ((nilai)*255)/1000);
//kirim data ke labview
//Serial.write(highByte(gram));
//Serial.write(lowByte(gram));
delay(100);
}
```

Resultados

En LabVIEW se realizó un programa de bloques (figura 14) en el cuál lee del dispositivo DAQ conectado de uno de los puertos USB de la computadora. Se hacen lecturas en serie de los tres valores de entrada analógico y posteriormente mediante un arreglo matricial se hace una multiplexión de las tres señales que finalmente se muestran en indicadores numéricos y gráficos.

Se depuró el código de Arduino para una mejor medición de manera que únicamente se tenga el código del sensor laser con su librería y las operaciones aritméticas necesarias para generar una señal analógica a través del puerto 5 del Arduino hacia la DAQ.

```
#include "Adafruit_VL53L0X.h"
int val=0;
Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();
const int analogOutPin = 5;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
   // Iniciar sensor
  Serial.println("VL53L0X test");
  if (!lox.begin()) {
    Serial.println(F("Error al iniciar VL53L0X"));
    while(1);
  }
}
  void loop() {
  VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
    Serial.print("Leyendo sensor... ");
  lox.rangingTest(&measure, false); // si se pasa true como parametro, muestra por puerto serie datos de debug
 float dist=measure.RangeMilliMeter;
 if (measure.RangeStatus != 4)
 {
   Serial.print("Distancia (mm): ");
  Serial.println(measure.RangeMilliMeter);
 }
 else
 {
   Serial.println("  Fuera de rango ");
 }
 float sampleBVal = 0;
for (int x = 0; x < 500; x++)
 {
 val = ((dist*255)/1100);
 sampleBVal = sampleBVal + val;
 }
float value = sampleBVal/500;
analogWrite(analogOutPin, value);
```

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 26, pp. 321-336.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



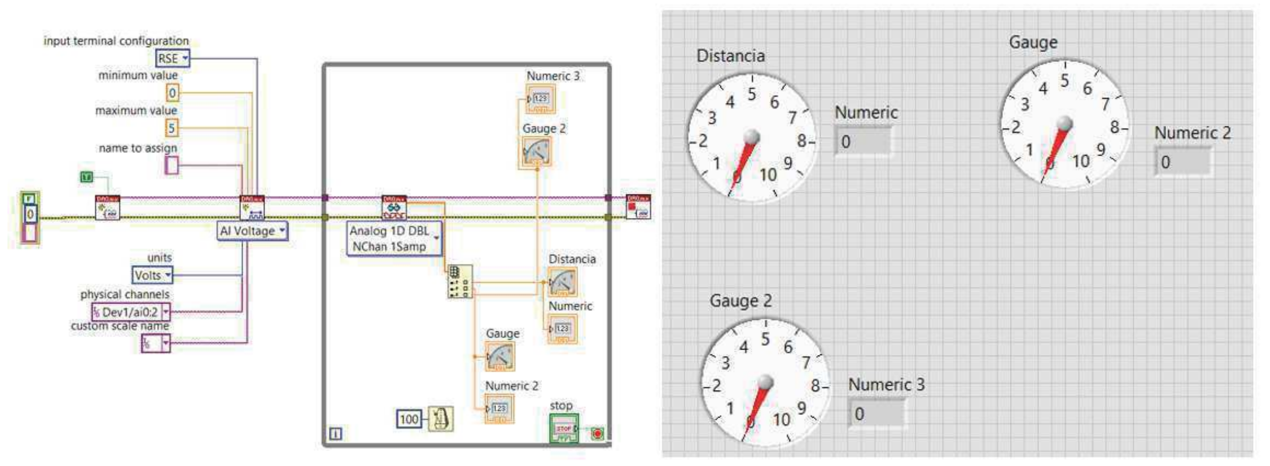


Figura 14. Programa de bloques en Labview.

Asimismo, el diagrama de bloques y el Instrumento Virtual queda como se muestra en la figura 15. Unicamente se tiene un bloque DAQ Assistant para tomar los datos de la DAQ, un bloque de escritura de datos en el cual se escriben las lecturas realizadas en un archivo de Microsoft Excel y la visualización en los indicadores, uno numérico y uno de barra vertical.

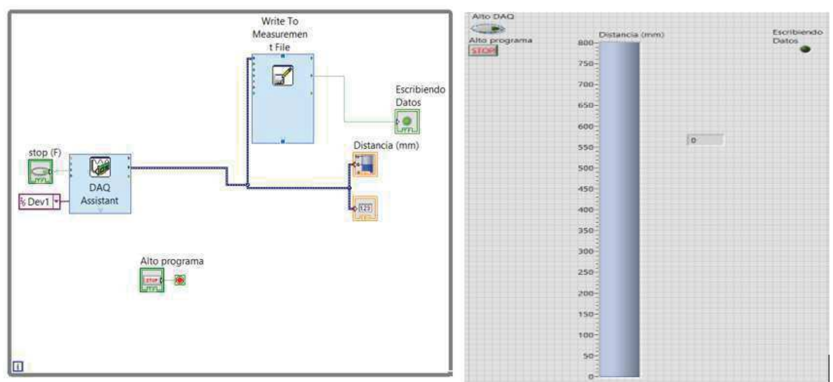


Figura 15. Interfase virtual final.

Finalmente, el sistema armado y conexión física quedó como en la figura 16, cabe destacar que por ahorro de espacio se optó por cambiar de dispositivo Arduino del modelo UNO al modelo Nano quedando con las conexiones integradas con una mayor fijación, para evitar falsos contactos entre terminales y alambrado. En este prototipo la alimentación para el Arduino es mediante su pin 27 VIN por medio del pin de salida de 5V de la DAQ así como su respectiva tierra.

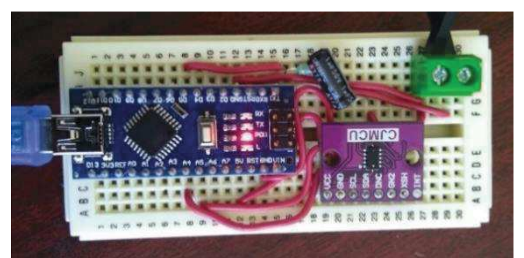


Figura 16. Integración del sensor de desplazamiento.

Así mismo en el prototipo se implementó un filtro RC (figura 17) debido a que Arduino no genera una señal analógica real, sino que utiliza un PWM en el que se varía el ciclo de trabajo de la señal de 5V, al implementar el filtro RC podemos convertir el PWM en una señal muy cercana a una analógica

ISBN: 978-607-9394-14-1.



real. El filtro utilizado tiene una resistencia de 47KΩ y un capacitor de 1uF conectado de la siguiente manera:

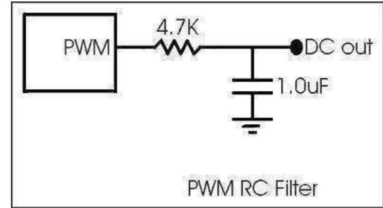


Figura 17. Filtro RC.

Durante la prueba comparativa con una experimentación destructiva, se pudo comprobar el comportamiento mediante la gráfica de la figura 18, en la cual se puede observar el desplazamiento de la adquisición de datos en la dirección del eje "Z" (deflexión).

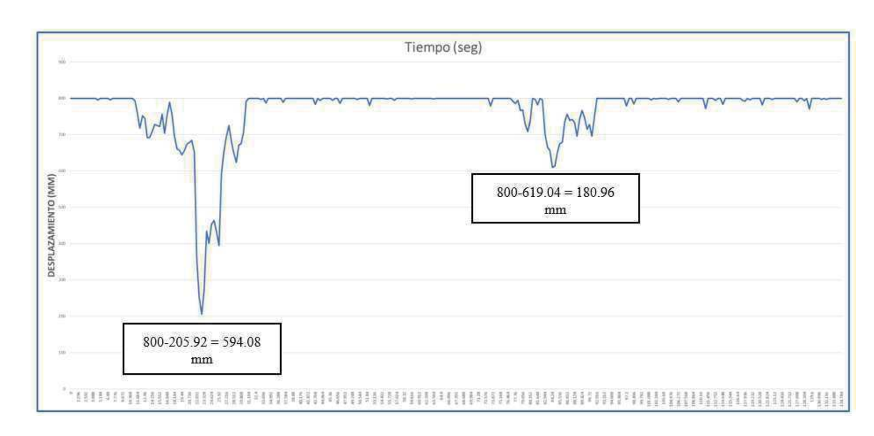


Figura 18. Gráfica de funcionamiento y comportamiento, para valores de desplazamiento en una dimensión.

7. Conclusiones

Durante el proceso de experimentación, se llegó a la conclusión de que la celda de carga debido a sus características no es viable para esta aplicación ya que el peso que puede sensar es directamente proporcional al tamaño de la celda, por tanto, se requeriría una celda muy grande y de alto costo para un marco de carga de 200 toneladas, lo cual reduce la factibilidad de esta implementación.

Por otro lado, el sensor de presión es idéntico en funcionamiento a los comerciales de mayor escala por tanto no hay posibilidad de innovación o mejora, por ello se decidió descartarlo del prototipo y trabajar con sensores comerciales. Dicho lo anterior el único dispositivo susceptible a mejora como sistema completo es el sensor de distancia, se decidió entonces trabajar sobre este único sensor en un sistema mucho más reducido e innovador como medidor de desplazamiento en marcos de carga de 200 toneladas.

Una de las ventajas principales adicionales al bajo costo es la flexibilidad para adecuar la interface de adquisición de datos, al estar desarrollada en el software Labview es posible acondicionar la señal de entrada a la DAQ, para disminuir el ruido, almacenar y graficar los datos, así como emplear los datos almacenados para con el bloque "Formula" matemáticamente determinar la deformación o el coeficiente de Poisson. Asimismo, es posible expandir la adquisición de datos mediante la integración de otros sensores VL53L0X acoplados al Arduino UNO y DAQ USB 6009.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se concluye que desarrollar material didáctico es un proyecto es de alta viabilidad, en base a las pruebas realizadas -las cuales determinaron que el sensor cuenta con alta precisión y exactitud en un rango milimétrico-. Como trabajo futuro se establece el requerimiento de una prueba comparada entre el sensor desarrollado y un sensor LVDT utilizado en la instrumentación convencional con un alto costo para los marcos de reacción de 200 toneladas.

Referencias

[1] UNESCO, Didáctica, aprendizajes y competencias, vol. 17, Caracas: UNESCO, 2016.
[2] J. A. Comenio, Didáctica magna, 2014.
[3] M. N. Skatkin y V. V. Kraievsky, «Investigaciones didácticas en la U R S S y métodos para introducir sus resultados en la práctica,» PERSPECTIVAS, pp. 301-315, 1978.
[4] A. Weil-Barais, «Los constructivismos y la didáctica de las ciencias,» Perspectivas, pp. 197-207, 2001.
[5] UNESCO, «"Conferencia Mundial sobre la Educación Superior",» de La educación superior en el siglo XXI. Visión y acción, PARIS, 1988.
[6] D. M. Bartlett y I. L. G. Benavides, El fraude de la reforma educativa, Puebla: CIPAE, 2016.
[7] BUAP, Modelo Universitario Minerva (MUM). Documento integrador, Primera ed., Puebla: BUAP, 2007.
[8] UNESCO, ¿Cómo promover el interés por la cultura científica?, Santiago: UNESCO, 2005.
[9] W. Searles, «La heurística en la enseñanza,» Perspectivas, 1979.
[10] M. M. Rabecq, «JUAN AMOS COMENIUS apóstol de la educación moderna y de la comprensión internacional,» El correo, 1957.
[11] G. Vergnaud, «Piaget y la didáctica,» Perspectivas, pp. 195-200, 1996.
[12] D. E. Blanco, R. M. Cervera y A. B. Suárez, ANÁLISIS MATRICIAL DE ESTRUCTURAS, Barcelona: CIMNE, 2015.
[13] F. Giménez y et al, «Simulación de esfuerzos en pórticos,» Modelling in Science Education and Learning, pp. 207-221, 2011.
[14] UNESCO, Enseñar las ciencias experimentales, SANTIAGO DE CHILE: UNESCO, 2003.
[15] UNESCO, Programas de formación docente en servicio en el Perú: Experiencias y aprendizajes durante el periodo 2011-2015, Lima: UNESCO, 2017.
[16] UNESCO, Proyecto Principal de Educación UNESCO-América Latina, vol. 1, La Habana, 1959.
[17] L. Albala-Bertrand, «Por una didáctica constructivista socio-genética de la ciudadania,» Perspectivas, 1996.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 337-347.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sistema de Monitoreo de Temperatura y Humedad en Suelos Agrícolas Bajo el Concepto de Internet de las Cosas

Polo Lara José Alberto[1]*, Méndez Alonso José Miguel[2], Ramiro Ramiro José[3], Benavidez Avalos Cinthya Carol[1] y Espejo Ponce Luis Alberto[2]

[1]Alumno Investigador de Ingeniería Informática, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla
[2]Profesor Investigador de Ingeniería Informática, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla
[3]Profesor Investigador de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla

Resumen

El desarrollo de las tecnologías informáticas hoy en día se ha incrementado velozmente en el bienestar de las personas; ejemplo claro de ello son los cultivos agrícolas. En el presente trabajo se da a conocer el desarrollo metodológico de un sistema integral bajo el concepto de internet de las cosas a fin de visualizar y obtener información sobre temperatura y humedad del suelo en zonas de cultivo de papa y maíz de la Sierra Nororiental del Estado de Puebla, con la finalidad de otorgar a los agricultores información acertada y verídica a través de un despliegue textual sobre un monitor de ordenador, indicando si es necesario activar los sistemas de riego, o que estos sean fumigados para contrarrestar la proliferación o ataque del hongo (Tizón) en suelos agrícolas con índices superiores al 80% de humedad. Para el desarrollo del trabajo expuesto se consideró el uso de un entorno Web, el Sistema Gestor de Base de Datos My SQL, un sistema electrónico basado en Arduino y de Red de Área Local para la obtención, transporte, almacenamiento y tratamiento de información. De igual manera, es sustancial señalar que el desarrollo del presente trabajo prevé obtener un impacto de mejora ambiental y social en cuanto a un el aprovechamiento adecuado de recursos naturales.

Palabras clave: Arduino, Internet de las cosas, Sensor, Sistemas Gestores de Base de Datos, Sistemas Web.

1. Introducción

Internet de las cosas, denominado "Internet de los objetos", lo cambiará todo, incluso a nosotros mismos. Si bien puede parecer una declaración arriesgada, hay que tener en cuenta el impacto que Internet ha tenido sobre la educación, la comunicación, las empresas, la ciencia, el gobierno y la humanidad. Claramente Internet es una de las creaciones más importantes y poderosas de toda la historia de la humanidad.

Esto está empezando a transformar la forma de hacer negocios, la organización del sector público y el día a día de millones de personas. Por ello, empresas y emprendedores se encuentran en la carrera por innovar en términos de almacenamiento, velocidad, acceso y métodos de análisis de datos que nos da una gran ventaja para que nuestros datos sean procesados de una forma más rápida y consistente.

Es tal el desarrollo y la importancia que el Internet de las Cosas (IoT) ha alcanzado, que diferentes informes la consideran como una de las tecnologías de mayor impacto para el 2025 y se prevé que miles de millones de elementos físicos u objetos serán equipados con diferentes tipos de sensores y actuadores conectados a internet a través de las redes de acceso heterogéneas en tiempo real [1], generando una gran cantidad de flujo de datos que deben ser almacenados, procesados y presentados en forma eficiente y fácilmente interpretable.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 337-347.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Es aquí donde la integración del Internet de la Cosas IoT, permite que esta gran cantidad de datos puedan ser alojados en internet, permitiendo que recursos, servicios y datos estén disponibles para su uso y para la prestación de servicios [2].

El Internet de la Cosas (IoT) es una extensión de la actual Internet que posibilita las conexiones y comunicaciones entre objetos y dispositivos físicos; considerando la forma en que se intercambian los datos, reuniendo todos los recursos e interacciones que involucran a los dispositivos, los datos y las personas en la Web [3].

Es, por ende, que con el proyecto Sistema de monitoreo de temperatura y humedad en suelos agrícolas Bajo el Concepto de Internet de Las Cosas se podrá obtener y guardar información sobre las muestras que se recolectaran relacionadas con temperatura y humedad. Para el procesamiento de la información obtenida con los sensores antes mencionados se ha desarrollado una aplicación web conectada a una Base de Datos conteniendo dichos parámetros. La información almacenada es validada en donde se generan graficas con su respectivo reporte final de análisis.

2. Metodología de solución

El desarrollo metodológico del presente trabajo se consolidó en el desarrollo de un prototipo operacional, realizado en cuatro fases; integrando consigo un sistema integral bajo el concepto de Internet de las Cosas (IoT) a fin de transportar información detectada por sensores de cada punto que el usuario desee guardar en dicho sistema y obtener la visualización de gráficas y generación de reportes de análisis de suelos, tal como se ilustra en el diagrama siguiente.

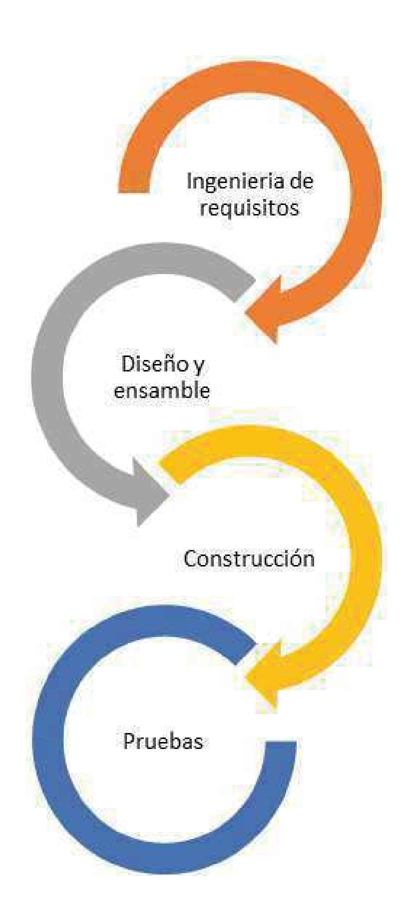


Figura 1. Metodología de desarrollo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



***2.1* Ingeniería de requisitos**

Con base a entrevistas realizadas, con clientes potenciales se pudo constatar que:

Desde tiempos remotos lo agricultores de la sierra Nororiental del estado de Puebla se disponían a cultivar plantas de papa y maíz en sus tierras, sin analizar detenidamente los factores detonantes que pudiesen afectar sus cultivos, efectuando esta práctica de manera empírica. Causando en múltiples ocasiones la pérdida de su cultivo o una merma considerable en sus ganancias.

Por ende, se consideró necesario desarrollar un prototipo operacional integrando consigo un sistema integral bajo el concepto de Internet de las Cosas que sea capaz de detectar las características de temperatura y humedad del suelo, a fin de permitir a los agricultores obtener información que sea empleada como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones.

***2.2* Diseño y Ensamble del sistema electrónico**

Para comprender la idea general del sistema integral de monitoreo de suelos fértiles es indispensable conocer los componentes que son parte del mismo, así como su interacción para lograr recabar información de suelos fértiles de manera exitosa, esto es ilustrado en la figura 2 en el diagrama a bloques siguiente.



Figura 2. Diagrama a bloques del sistema integral.

Posterior a la fase de la ingeniería de requisitos, se inicia con el modelado de sistema y la creación de la base de datos, donde la comunicación entre ambos se realizó a través de una intranet. El modelado de sistema se efectúo utilizando el principio Entidad- Relación (E-R) el cual "es la percepción de un mundo real que consiste en un conjunto de objetos básicos llamados entidades y de unas relaciones entre estos objetos" [4] empleando MySQL como Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD) para almacenar información concerniente a los usuarios registrados y las muestras tomadas por todos los prototipos, diferenciando estas con un número de serie de cada sistema electrónico.

Es sustancial mencionar que la creación de las entidades definidas en el SGBD se realizó mediante el proceso de normalización hasta la tercera forma normal (3FN), tal como se ilustra en la figura no. 3.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 337-347.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



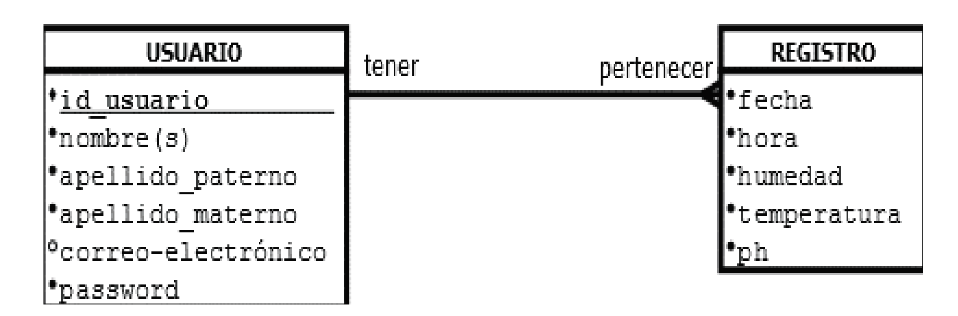


Figura 3. Modelo Entidad-Relación(E-R) de la Base de Datos del Sistema.

Así mismo, para la representación del modelado se empleó lenguaje UML. El Lenguaje UML se entiende de la siguiente manera: “creado para forjar un lenguaje de modelado visual común y semántica y sintácticamente rico para la arquitectura, el diseño y la implementación de sistemas de software complejos, tanto en estructura como en comportamiento. UML tiene aplicaciones más allá del desarrollo de software, p. ej., en el flujo de procesos en la fabricación.” [5]

A través del lenguaje gráfico UML, se efectúo la representación visual del modelo a fin de visualizar, especificar y documentar los métodos y funciones que contiene el sistema como se ilustra en la Figura 4.

USUARIO
+id_persona +nombre(s) +apellido_pat +apellido_mat +correo_electrónico +password
+registrarse_en_sistema() +iniciar_sesión() +visualizar_gráficas() +generar_promedio() +generar_reporte() +borrar_información_de_la_base_de_datos() +estimar_comportamientos_futuros_de_datos(+personalizar_perfil() +cerrar_sesión()

Figura 4. Diagrama de Clases del Sistema.

A través de los casos de uso se logró describir las acciones del sistema desde el punto de vista del usuario. Es importante señalar que esta técnica loable permitió identificar la interacción y comportamiento del usuario con el sistema. En este caso de uso el cliente se encuentra realizando diversas acciones, tales como el registro al sistema, inicio de sesión, visualizar gráficas, generar promedio, generar reporte de análisis, borrar información de la base de datos, personalizar perfil de usuario, estimar comportamientos futuros de los datos y el cierre de sesión como se logra apreciar en la Figura 5.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



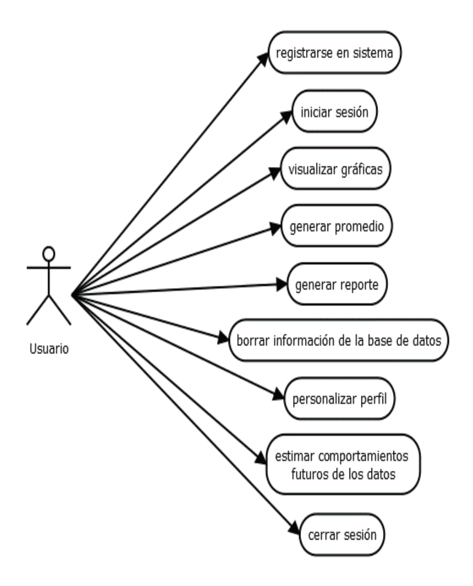


Figura 5. Diagrama de Casos de Usos.

Una vez obtenido el modelado general del sistema informático, se procede a realizar el modelado de las conexiones necesarias para que el sistema electrónico pueda funcionar de manera adecuada, el cual, es el encargado de recopilar información referente a temperatura y humedad en suelos fértiles, con el fin de poder ser almacenados, lo cual se muestra plasma en las figuras 6-8.

En la imagen 6 se la conexión que corresponde al sensor LM35 el encargado de recibir señales de variación de temperatura en el suelo, para posteriormente ser interpretadas por la tarjeta de desarrollo Arduino.

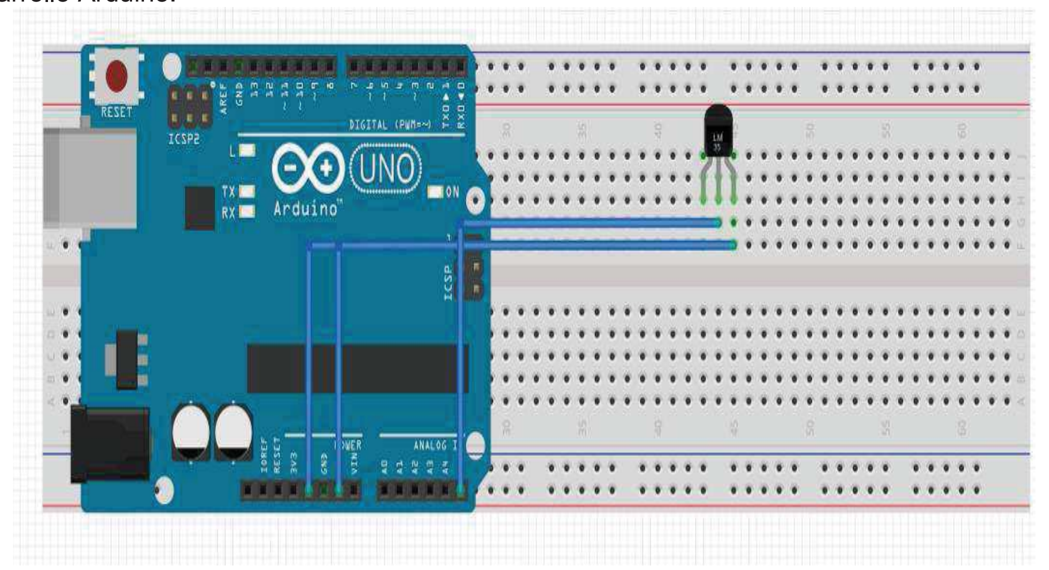


Figura 6. Diagrama de conexión para el sensor de temperatura LM35.

También, resulta indispensable contar con la conexión del sensor de humedad compuesto por los módulos YL-38 y YL-69, los cuales son los encargados de recopilar señales sobre el nivel de humedad del suelo y posteriormente ser procesadas por la tarjeta de desarrollo Arduino.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 337-347.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



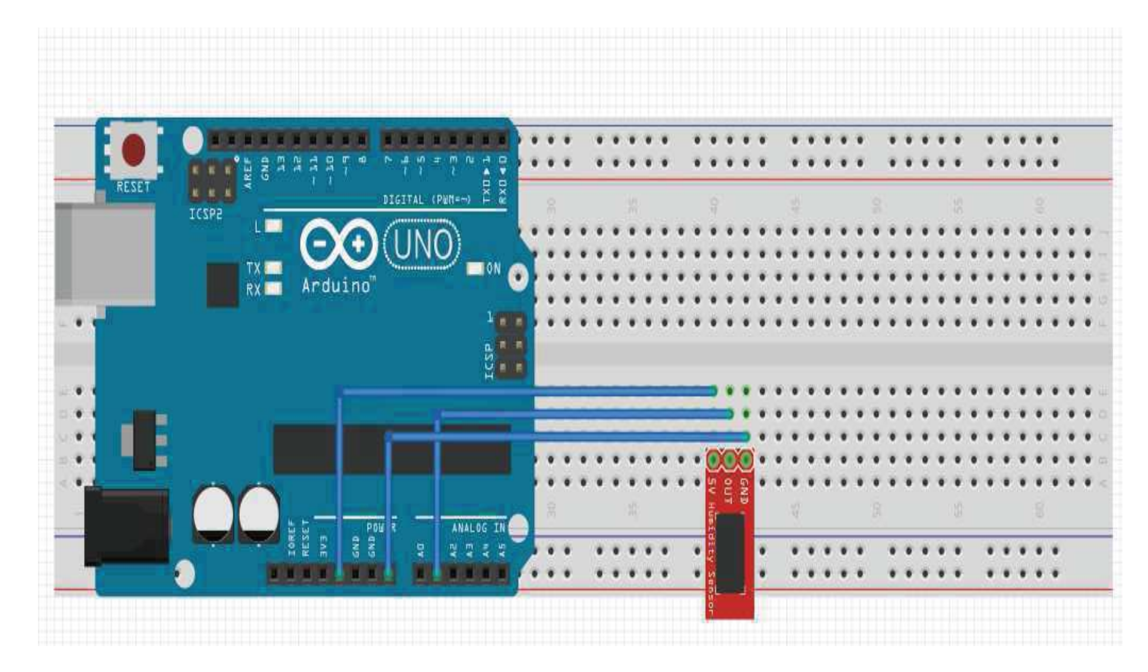


Figura 7. Diagrama de conexión para el sensor de temperatura LM35.

Por otra parte, se ha obtenido el modelado de la conexión correspondiente a la LCD 2004 que es utilizada para visualizar en tiempo real información captada del suelo por parte de los sensores al mismo tiempo que es almacenada en nuestro centro de datos para posteriormente hacer un tratamiento adecuado a la información recopilada, lo cual se muestra en la figura 8.

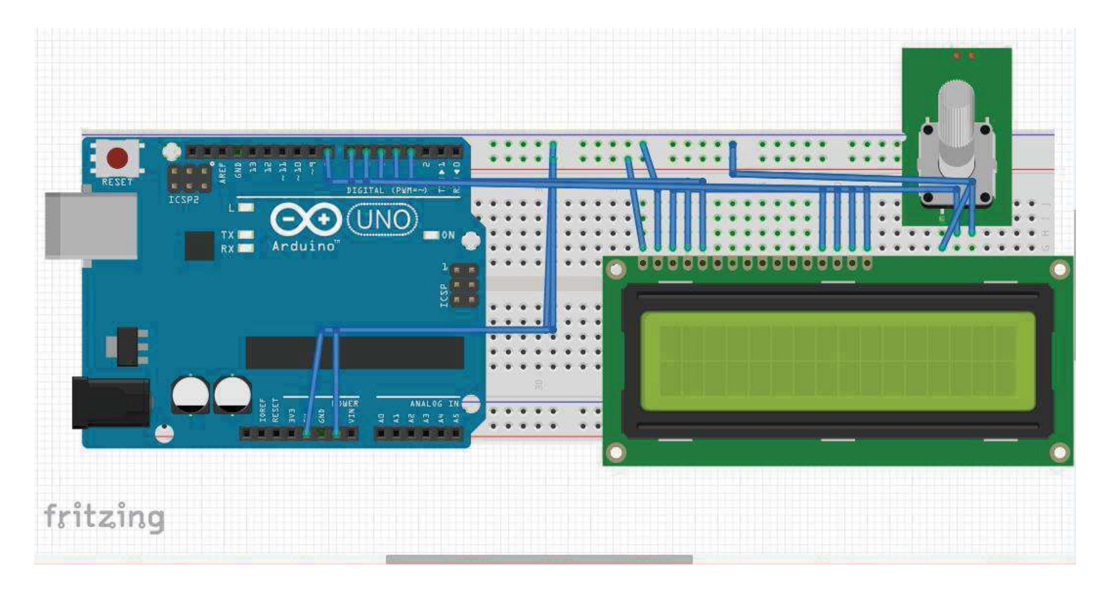


Figura 8. Diagrama electrónico de conexión de la pantalla Monocromática 2004.

2.3 Construcción

Para desarrollar esta fase, se consideró el uso de los siguientes materiales: Arduino UNO, Arduino, módulo Ethernet, cable de red, sensor de temperatura, de humedad, botones, Jumpers, resistencias, Protoboard, pantalla monocromática LCD 2004 y módulo para baterías de 9 volts. Mismos que tiene la función de recoger los datos que son leídos por parte de los sensores antes citados sobre temperatura y humedad, en donde posteriormente son enviarlos a través de la red.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Además, pensando en la comodidad del usuario final, se añadió un botón al sistema electrónico para que al oprimirlo realice el almacenamiento de registros en la Base de Datos mediante una Intranet haciendo uso como primera fase del proyecto un módulo Ethernet, en donde el prototipo es conectado al equipo de cómputo, lo cual permite la transferencia exitosa de la información hacia el sistema de información en tiempo real, emitiendo un sonido y un mensaje en la pantalla del sistema electrónico para comprobar el almacenamiento exitoso de datos el cual se ilustra en la Figura 9.

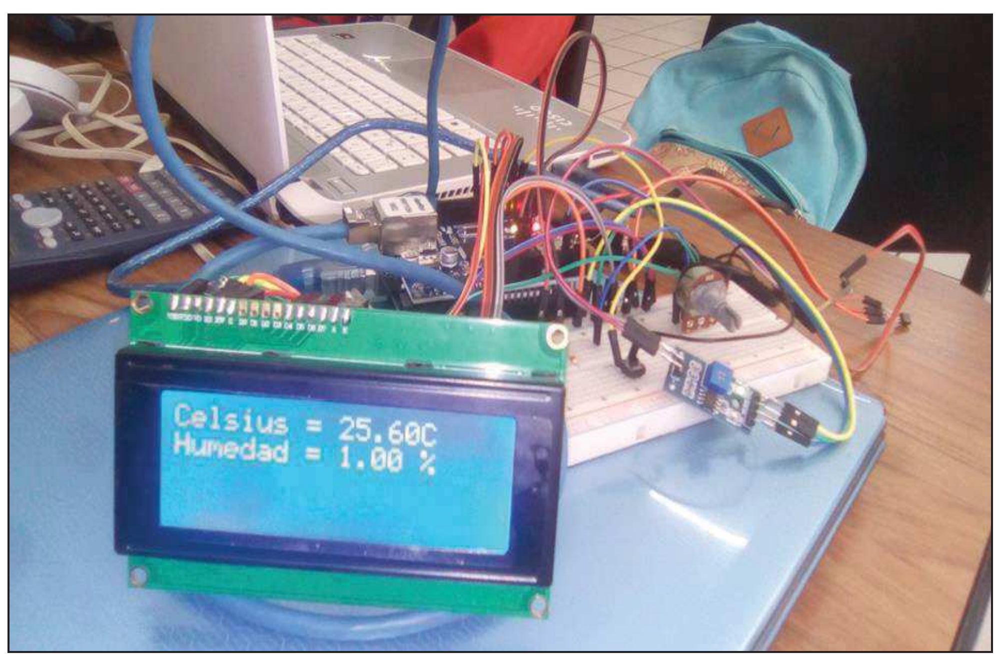


Figura 9. Ensamble y conexión en la primera fase del prototipo electrónico.

2.4 Pruebas.

En esta etapa, se realizó la comunicación del sistema electrónico a través de una red LAN empleando una Arquitectura Cliente-Servidor. Implementando del lado del cliente el sistema web basado para un sistema electrónico creado en el punto anterior; mientras que del lado del servidor se implementó un servidor Web (Apache), mediante el cual, haciendo uso de un script PHP, se realizó la inserción de registros a la Base de Datos alojada en MySQL como Sistema Gestor de Base de Datos (SGBD). Cabe destacar que las inserciones de los datos, se efectuaron a partir de tomar puntos de interés, donde el usuario puede oprimir un botón para enviar las lecturas realizadas por los sensores de temperatura y humedad del suelo.

De igual manera en esta fase, se procedió a programar el sistema electrónico con el lenguaje de programación Arduino empleando el protocolo de comunicación TCP-IP en donde “cada dispositivo que desee acceder a Internet requiere de una dirección para ser identificado y reconocido; el cual se define como un sistema global de redes de comunicación interconectadas” [6] , definiendo una IP estática y una puerta de enlace del mismo rango de la red LAN para que existiera comunicación entre el servidor y el cliente; con la finalidad de que, el usuario pueda enviar información de temperatura, humedad del suelo analizado, para posteriormente, mediante el uso del Sistema Web, obtener reportes y graficas de análisis, donde, en el Sistema Gestor de Base de Datos tiene la capacidad de recibir dicha información sobre temperatura, humedad, fecha y hora de captura de cada registro y el número de serie de cada prototipo, lo cual cada usuario puede acceder solo a los registros que su sistema electrónico envié a la base de datos, lo cual se garantiza la seguridad e integridad de la información tal como se ilustra en la figura 10.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



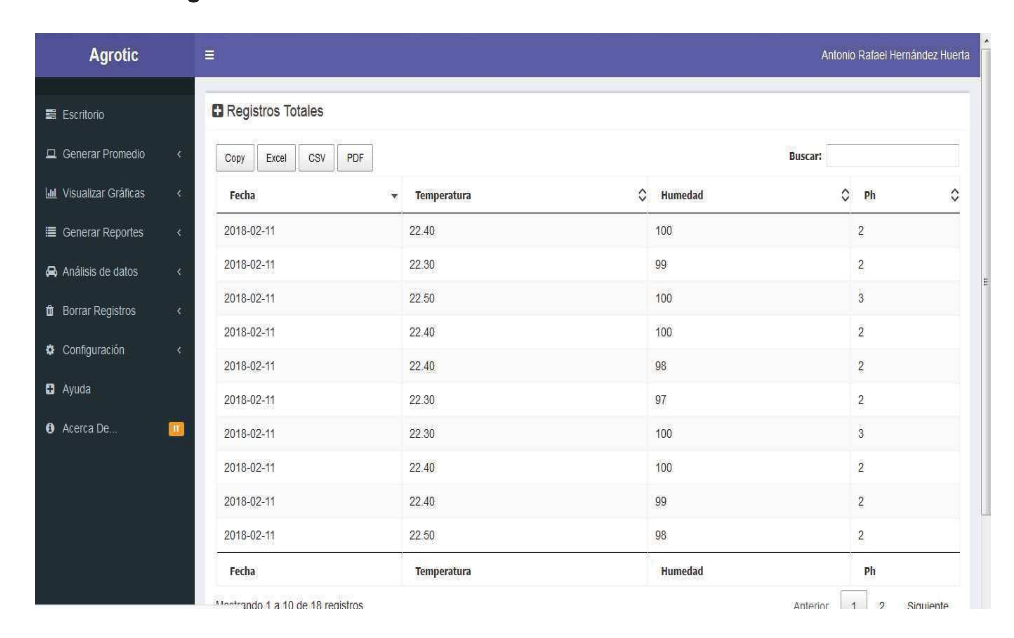
Para el alojamiento de la información obtenida con el prototipo se desarrolló una aplicación computacional Web Responsivo, cuyas interfaces se muestran en las Figuras 7 y 8, interconectada a una Base de datos, utilizando las herramientas de HTML5, PHP, Servidor Web (Apache), MySQL como manejador de bases de datos y TCPDF para la generación de reportes.
Todo esto logrado gracias a la recolección de requerimientos durante todo el modelado del sistema en general.



☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:32:09	25.6	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:32:12	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:32:35	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:32:41	26.08	7	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:33:22	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:33:26	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:34:52	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:34:54	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:34:56	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:34:57	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:34:58	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:35:21	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:36:19	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:36:25	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:39:50	26.08	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:39:55	26.55	1	4	AGROTIC0000001
☐	Editar	Copiar	Borrar	2017-05-29 12:41:04	26.55	1	4	AGROTIC0000001

Consola

Figura 10. Obtención de información del sistema electrónico.



Fecha	Temperatura	Humedad	Ph
2018-02-11	22.40	100	2
2018-02-11	22.30	99	2
2018-02-11	22.50	100	3
2018-02-11	22.40	100	2
2018-02-11	22.40	98	2
2018-02-11	22.30	97	2
2018-02-11	22.30	100	3
2018-02-11	22.40	100	2
2018-02-11	22.40	99	2
2018-02-11	22.50	98	2
Fecha	Temperatura	Humedad	Ph

Figura 11. Página consulta de datos del Sistema Web

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 27, pp. 337-347.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 12. Módulo de Graficación de Datos

3 Resultados

Como resultado de esta investigación se generó un prototipo que integra los siguientes componentes: una Protoboard, Arduino uno, cables de conexión, fuente de alimentación, pantalla monocromática 2004 que fue conectada a las salidas digitales del mismo Arduino, sensor de temperatura y humedad conectados a una entrada analógica para poder convertir estas señales en salidas digitales, potenciómetro para regular la nitidez de la LCD.

Una vez conectados todos esos dispositivos en una protoboard, puesto que en este trabajo aún no se ha considerado él diseño y fabricación de una PCB, además de que en trabajos futuros se pretende hacer mejoras al sistema electrónico, como el implementar un sensor que sea capaz de medir el potencial de Hidrogeno (pH), variable que hace referencia al nivel acidez o de basicidad del suelo, como factor fundamental para el desarrollo de suelos, según INIFAP; se procedió a la programación en la Plataforma Arduino y se compiló el código al microcontrolador encargado de interpretar las señales recibidas.

Pensando en la comodidad del usuario final, se añadió un botón al sistema electrónico para que al oprimirlo realice el almacenamiento de registros, emitiendo un sonido con esta acción.

Se programó un sistema web utilizando HTML5 y PHP, interconectado con base de datos creada en MySQL para hacer un tratamiento más preciso de toda la información generada del prototipo antes mencionado, el software desarrollado tiene la funcionalidad de:

- ✓ Mostrar fecha y hora actual de la extracción de la muestra
- ✓ Alojar la información contenida en la tabla de la aplicación, anexando fecha y hora del momento que son computados esos datos, a una base de datos desarrollada en MySQL con ayuda de un servidor web (Apache).
- ✓ Validación de todos los datos obtenidos los cuales pueden ser consultados mediante la introducción, en un cuadro de texto, la fecha en la que queremos obtener el promedio general de esa fecha y hasta el momento es el único método estadístico que el sistema puede brindar.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



- ✓ Eliminar información de la base de datos cuando ya no se necesite
- ✓ Reiniciar área de trabajo para volver a introducir nuevos registros y hacer nuevas consultas.
- ✓ Generar reportes de resultados en formato PDF.
- ✓ Generar graficas de comportamiento del suelo a través del tiempo.
- ✓ Evaluar la información recibida en la Base de Datos para saber si el cultivo está en riesgo de sequía o a punto de desarrollar un hongo (Tizón)

Cabe mencionar, que en este caso particular se está tratando un área de cultivo de 40 metros x 20 metros, puesto en este primer trabajo de investigación se están tomando puntos de forma manual con el prototipo oprimiendo un botón, el cual permite que el sistema envié esas lecturas al Sistema Gestor de Bases de Datos Relacionales (MySQL) alojado en un sistema de cómputo local, que a su vez es alimentada por una batería de 9 Volts, lo cual se muestra en la imagen numero 13 como prueba piloto del funcionamiento del sistema integral (Electrónico e Informático).



Figura 13. Zona de cultivo de papa y maíz

2 Conclusiones

Se desarrolló un prototipo que permiten obtener y almacenar datos relacionados con la temperatura y humedad del suelo, que son procesados utilizando un sistema web, como se ilustra Figura 8, de tal forma que los usuarios puedan conocer si su cultivo está expuesto a amenazas relacionadas con esto factores ambientales, generando un informe para que los agricultores tengan la posibilidad de tomar acciones correctivas, en caso de ser necesario.

Como trabajos futuros al sistema electrónico se incluirá un sensor de potencial de Hidrogeno (pH), factor de suma importancia, ya que este sensor permite evaluar el nivel de acidez o basicidad en que se encuentra el área de cultivo y, por ende, beneficiar o afectar el desarrollo del cultivo de papa y maíz, además de un módulo Wi-Fi para enviar los datos obtenidos al centro de datos del Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, además se incluirá mayor funcionalidad a la versión web del sistema, mismo que tendrá la capacidad de comunicarse al mismo centro de datos. También se pretende desarrollar la versión móvil multiplataforma del sistema de información creado.

Se busca integrar un algoritmo de inteligencia artificial y de Minería de Datos (Bayes, PDA) para predicción de parámetros en el futuro, dotando así información para una acertada toma de decisiones que nuestros usuarios puedan entender con facilidad.

Por otro lado, se efectuará la consolidación de un plan de negocios sólido y también se pretende obtener la patente de esta investigación realizando la gestión administrativa correspondiente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Referencias

[1] W. CHONGGANG, D. MAHMOUD, D. MISCHA, H. R. QINGYANG, M. XUFEI, and W. HONGGANG, "Guest Editorial Special Issue on Internet of Things (IoT): Architecture , Protocols and Services," IEEE Sens. J., vol. 13, no. 10, pp. 3505–3510, 2013.

[2] A. R. Biswas and R. Giaffreda, "IoT and Cloud Convergence: Opportunities and Challenges," 2014 IEEE World Forum Internet
Things, pp. 375–376, 2014.

[3] Gustafson Steven, Sheth Amit, La Web de las Cosas. Marzo del 2014, disponible en: https://www.computer.org/portal/web/computingnow/archive/march2014-spanish [Recuperado el 26 de febrero de 2018].

[4] Fray León Osorio Rivera., (2008), Bases de Datos Relacionales Teoría y Práctica, ITM, pg. 25.

[5] Gauchat J. El gran libro de HTML 5, CSS3 y JavaScript (1ra Edición en electrónico). 2012. Barcelona, España. Marcombo.

[6] Martine van der Steeg. et al., (2012), EXIN Cloud Computing Foundation, Van Haren.

[7] Vega, M. (octubre de 2010). Casos de Uso UML. Granada, Andalucía, España.

[8] Vicenç Fernández Alarcón, (2010), Desarrollo de sistemas de información: una metodología basada en el modelado, Univ. Politèc. de Catalunya.

[9] SAGARPA, (2017). [en linea] Disponible en
http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/puebla/Documents/Difusi%C3%B3n/ALTERNATIVAS_POTENCIAL_COMERCIALIZACI%C3%93N-Puebla.pdf [Recuperado el 6 de marzo de 2018].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 348-360.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de un Robot Paralelo de Estructura Desacoplada

Ramos Alvarado Raymundo[1], Edgar Daniel García Hernández[1], Ruíz Torres Maximiano F.[1] y Sandoval Castro X. Yamile[2]

[1]CICATA-IPN, Unidad Querétaro. Instituto Politécnico Nacional. Cerro Blanco 141. Col. Colinas del Cimatario. Querétaro, Qro. C.P. 76090
[2] CONACYT-IPN.

Resumen.

Se presenta el diseño de un robot paralelo. La metodología para diseñar el manipulador consistió en proponer una arquitectura basada en mecanismos paralelos desacoplados. Además, se obtuvo el modelo cinemático directo implementando la convención Denavit-Hartenberg. Se determinó el modelo geométrico inverso del robot mediante el método de accionamiento lineal. Se calculó la matriz Jacobiana del robot, con la finalidad de realizar el análisis de singularidades. Al no presentar singularidades se aprovecha en su totalidad el área de trabajo en comparación con los robots tipo delta. El problema que se resuelve con esta arquitectura es el aprovechamiento del espacio de trabajo sin presentar singularidades y aumentando el área de trabajo en comparación con los robots paralelos tipo delta, generando con esto un robot capaz de llegar a desarrollar tareas similares a estos robots.

Palabras clave: Manipulador, robot paralelo, mecanismos paralelos, singularidades, mecanismo desacoplado.

1. Introducción.

El interés en el estudio de robots de mecanismo paralelo ha crecido de forma notable en los últimos años, actualmente existen trabajos enfocados principalmente en su análisis cinemático y dinámico, también se han desarrollado trabajos de este tipo de robots para aplicaciones en procesos industriales, principalmente manipuladores. Existen investigaciones y desarrollo de prototipos en otras áreas como la medicina, en las cuales los robots paralelos son diseñados para realizar terapias.

Las investigaciones en el desarrollo de nuevas arquitecturas de mecanismos paralelos han abierto un campo de investigación, el de manipuladores de mecanismo paralelo desacoplado. Esta variante en las arquitecturas consiste en localizar los actuadores sobre los ejes cartesianos X, Y y Z, esto restringe el número de grados de libertad del manipulador, por lo que normalmente los grados de libertad son menores a 4. Además, los movimientos son de traslación o de rotación puros, debido a que, realizar un diseño de un manipulador que permita estos dos tipos de movimientos es de mayor complejidad.

Los robots paralelos tienen características que permiten introducirlos en procesos industriales donde se requiere transportar objetos a altas velocidades. Existen robots comerciales con diferentes arquitecturas que son utilizados para manipular objetos, los de mayor impacto en los procesos industriales son comercializados por las empresas ABB, Festo y Toshiba.

Uno de los mecanismos más estudiados es el robot paralelo tipo delta (Figura 1). Este robot está constituido por dos plataformas, una fija y otra móvil, y tres cadenas cinemáticas separadas por ángulos de 120°. Cada cadena cinemática está formada por dos eslabones (el brazo y el antebrazo) y dos articulaciones esféricas pasivas. Los motores se encuentran en la plataforma fija, y transfieren movimiento a la plataforma móvil, mediante la combinación de movimientos de cada cadena cinemática cerrada. Las principales características de esta arquitectura consisten en que los motores

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 348-360.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



fijos permiten una carga inercial reducida, logrando mayores aceleraciones y velocidades en el efector final [1].

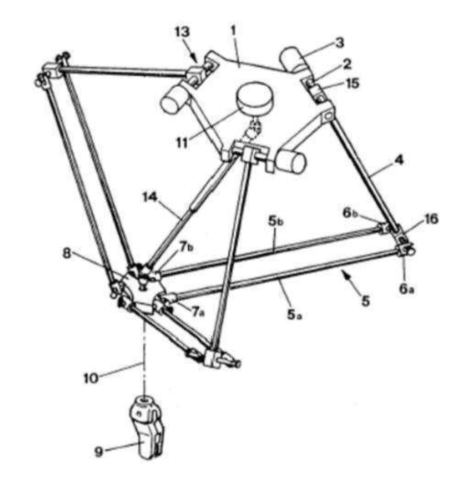


Figura 1. Robot paralelo tipo delta (Clavel) [1].

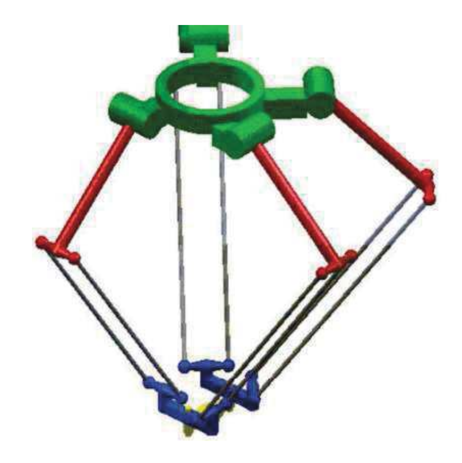


Figura 2. Robot paralelo de 4 grados de libertad (Pierrot) [2].

El H4 desarrollado por Pierrot [2] mostrado en la Figura 2, es otra variante, este manipulador a diferencia del tipo delta tiene un brazo más que le permite tener un grado de libertad (GDL) de rotación.

Otro tipo de manipuladores desarrollados son los robots paralelos de mecanismo desacoplado, este tipo de arquitectura consiste en el mismo patrón de las arquitecturas presentadas anteriormente, pero la diferencia está en la distribución de las articulaciones actuadas. Lo anterior permite distribuir las extremidades del robot en diferentes planos, por lo tanto, cada extremidad del robot puede realizar movimientos de forma independiente [3]. Comúnmente los grados de libertad de este tipo de robots son menores a 4, limitados a realizar movimientos de traslación o rotación puros.

La Figura 3., muestra un mecanismo propuesto con movimientos desacoplados, esta arquitectura consiste en 3 extremidades y es capaz de realizar movimientos de traslación [4].

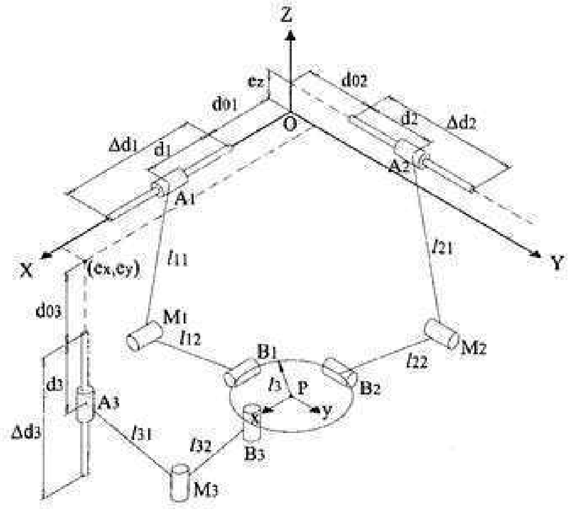


Figura 3. Robot paralelo de 3 grados de libertad [4].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



El Orthoglide es un robot paralelo traslacional. En la Figura 4., se presenta su arquitectura que consiste en 3 cadenas cinemáticas cerradas compuestas por articulaciones rotacionales (pasivas) y prismáticas (activas).

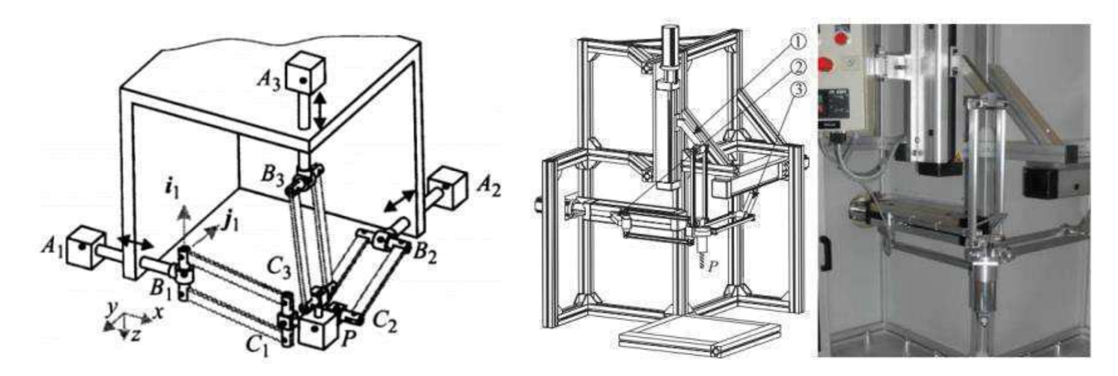


Figura 4. Robot paralelo, Orthoglide [5].

La Figura 5 muestra un manipulador traslacional con articulaciones prismáticas. Las Figuras 6 y 7 presentan arquitecturas desacopladas diseñadas para realizar movimientos de rotación puros.

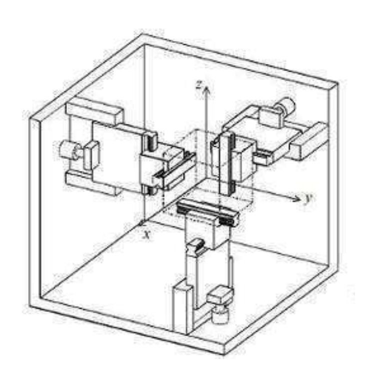


Figura 5. Manipulador 3-PPP [5].

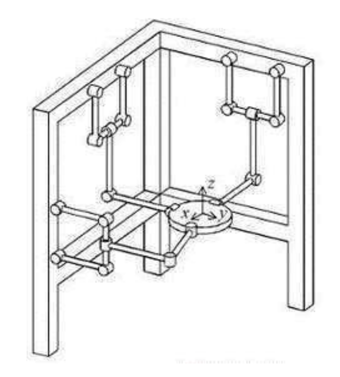


Figura 6. Manipulador 3-7R [5].

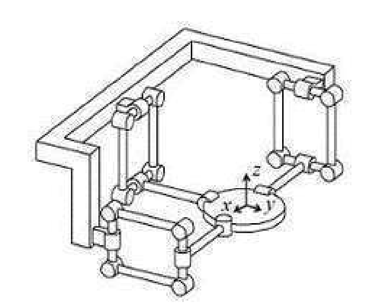
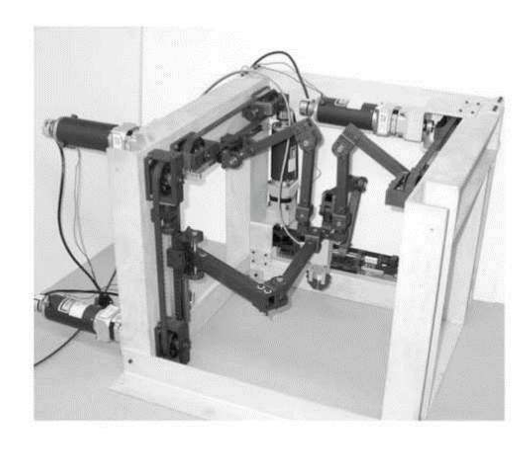
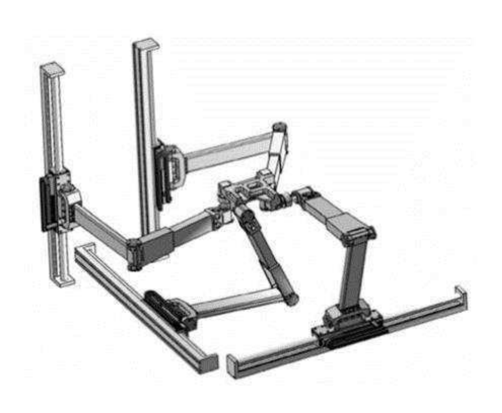


Figura 7. Manipulador 3-7R modificado [5].

La Figura 8 muestra un prototipo del robot Quadrupteron [7] y en la Figura 9 se presenta un prototipo en CAD del Isoglide [8].





Robótica y Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 348-360.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 8. Quadrupteron [7]. **Figura 9. Isoglide 4 [8].**

Ambos robots están construidos con una arquitectura paralela desacoplada donde las articulaciones prismáticas son actuadas. Estos manipuladores tienen 4 grados de libertad, 3 de traslación y uno de rotación.

En la Figura 10 se muestra el Pantopteron [9], un robot de estructura paralela parcialmente desacoplada, que está basado en las arquitecturas del Quadrupteron y el Isoglide 4. Este robot fue desarrollado para aplicaciones de *pick and place*, aunque presenta una arquitectura compleja en comparación con sus antecesores.

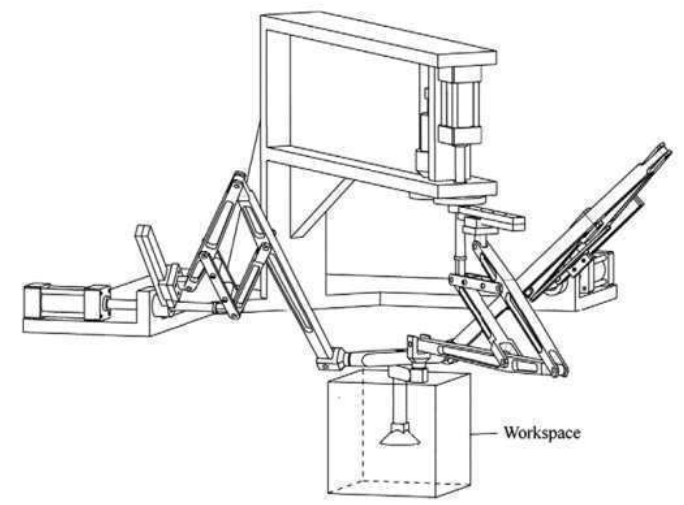


Figura 10. Pantopteron (Briot y Bonev, 2010).

Algunos autores como Li y Zhang [3] y Gosselin [7] proponen el estudio del movimiento de manipuladores paralelos desacoplados e indican que estos mecanismos muestran la oportunidad de simplificar la calibración de la posición original y mejorar la precisión de manipuladores paralelos en una forma práctica.

El uso de robots en la industria cada año va en aumento, así lo muestran las estadísticas de la IFR, esto debido a la necesidad por mejorar la producción y así mantener la competitividad, las empresas del sector automotriz son las principales en implementar robots para la automatización de los procesos, según un estudio realizado por The Boston Consulting Group, “Las empresas están descubriendo que los avances en la robótica y otras tecnologías de fabricación ofrecen algunas de las mejores oportunidades para mejorar drásticamente la productividad.”[13]

Este robot presenta una opción sencilla para realizar tareas similares a los robots tipo delta, evitando con ello las limitaciones que estos robots presentan, como el espacio reducido del área de trabajo y de las singularidades que se presentan al tratar de llegar a ciertas posiciones.

2. Descripción del Robot

La arquitectura del robot se presenta en la Figura 11. El robot consiste en una base fija en donde se ubica el marco de referencia global, el cual está identificado mediante X_m, Y_m, Z_m, respectivamente, el robot presenta 3 extremidades y una base móvil o efector final. Cada una de las extremidades está compuesta de eslabones $(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33})$ que están unidos por articulaciones pasivas. El método de accionamiento es lineal, además, el robot puede realizar movimientos desacoplados, lo cual ayuda a simplificar el análisis.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 28, pp. 348-360.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



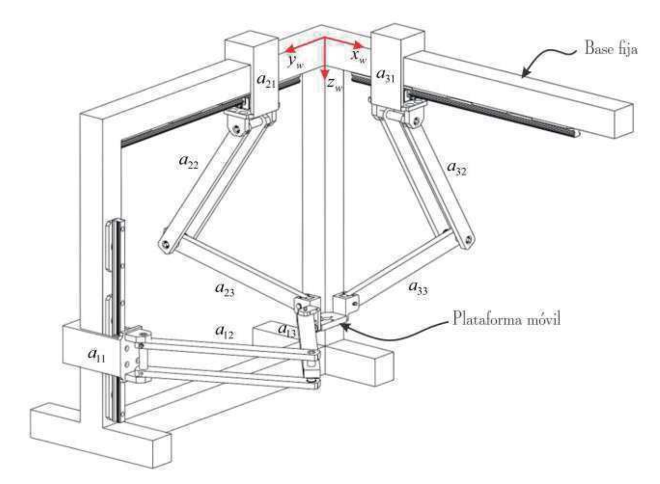


Figura 11. Arquitectura del robot paralelo de 3 GDL.

2.1 Movilidad del Robot.

La ecuación (3.3) [12], fue utilizada para realizar el cálculo de la movilidad del mecanismo. La ecuación está dada por:

$$M = \sum_{j=1}^{p} f_i - r = \sum_{j=1}^{p} [\, f_i \;\; - (\, S_{Gi} - S_F + r_l)] \tag{2.1}$$

Donde M es la movilidad del mecanismo o grados de libertad, p corresponde al número total de articulaciones, f es la movilidad o grados de libertad de la articulación i, r el número de parámetros que pierden su independencia en el mecanismo, r_l el número de parámetros que pierden su independencia en los lazos cerrados que pueden existir en el mecanismo, S_F corresponde a la conectividad del mecanismo, S_{Gi} es la conectividad del brazo G_i desconectado del mecanismo. Obteniendo:

$$M = 3\ g.d.l.$$

3. Análisis Cinemático.

En esta sección se muestra el análisis de posición del robot mediante los modelos geométricos directo e inverso y el análisis de singularidades, obteniendo los modelos se conoce la posición del robot en el espacio.

3.1 Deducción del Modelo Geométrico Directo (MGD)

El modelo geométrico del robot se realiza a partir de la deducción de los parámetros Denavit-Hartenberg. Dadas las características del robot, es posible realizar el análisis para una extremidad del robot y generalizar los resultados para el resto de las extremidades.

El modelo geométrico directo se determina mediante la convención Denavit-Hartenberg (D-H) para cada extremidad respecto a un marco de referencia local {0}. A continuación, se muestra un esquema de la i-ésima extremidad para obtener los parámetros D-H.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



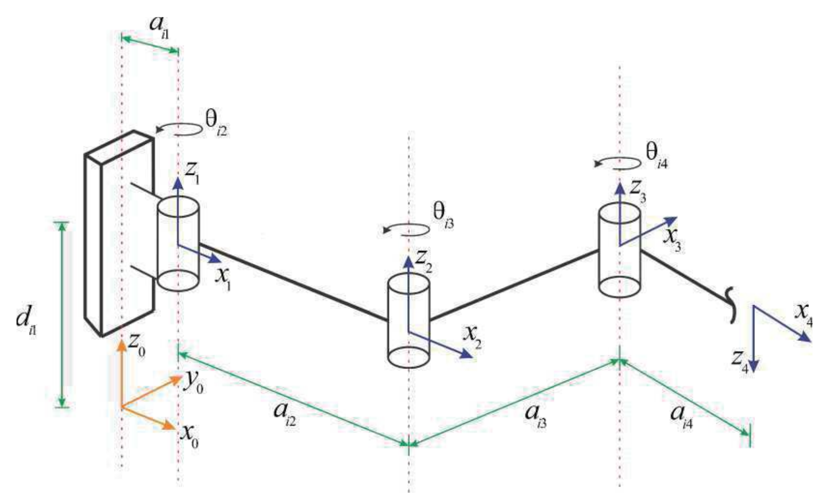


Figura 12. i-ésima extremidad del robot para la determinación de los parámetros D-H.

De la Figura 12, los parámetros Denavit-Hartenberg obtenidos para la i-ésima extremidad del robot se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Parámetros D-H de la extremidad i-esima.

Articulación i	a_i	α_i	d_i	θ_i
i1	a_{i1}	0	d_{i1}	0
i2	a_{i2}	0	0	θ_{i2}
i3	a_{i3}	0	0	θ_{i3}
i4	a_{i4}	π	0	θ_{i4}

Con los parámetros D-H obtenidos en la Tabla 2 se genera la matriz de transformación para cada eslabón con la siguiente forma:

$$^{n-1}A_n = \begin{bmatrix} cos\ \theta_i & -cos\ \alpha_i * sen\ \theta_i & sen\ \alpha_i * sen\ \theta_i & a_i * cos\ \theta_i \\ sen\ \theta_i & cos\ \alpha_i * cos\ \theta_i & -sen\ \alpha_i * sen\ \theta_i & a_i * sen\ \theta_i \\ 0 & sen\theta_i & cos\theta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Se implementa la misma metodología para el resto de los eslabones de cada extremidad que conforman al robot. A partir de las matrices de transformación de cada eslabón $^0A_1$, $^1A_2$, $^2A_3$, $^3A_4$ es posible obtener la matriz de transformación $^0A_4$ para cada extremidad del robot utilizando la ecuación (3.2).

$$^0A_1\,^1A_2\,^2A_3\,^3A_4 = \,^0A_4 \quad (3.2)$$

La matriz de transformación ^0A_n obtenida para la i-esima extremidad del robot, es:

$$^0A_4 = \begin{bmatrix} c\theta_{i2\ i3\ i4} & -s\theta_{i2\ i3\ i4} & 0 & a_{i4}c\theta_{i2\ i3\ i4} + a_{i3}c\theta_{i2\ i3} + a_{i2}c\theta_{i2} + a_{i1} \\ s\theta_{i2\ i3\ i4} & c\theta_{i2\ i3\ i4} & 0 & a_{i4}s\theta_{i2\ i3\ i4} + a_{i3}s\theta_{i2\ i3} + a_{i2}s\theta_{i2} \\ 0 & 0 & 1 & d_{i1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

De esta matriz se puede concluir las siguientes ecuaciones:

Para la extremidad i-esima:

$$A_x = a_{i4}c\theta_{i2\ i3\ i4} + a_{i3}c\theta_{i2\ i3} + a_{i2}c\theta_{i2} + a_{i1} \quad (3.4)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$A_y = a_{i4}s\theta_{i2\,i3\,i4} + a_{i3}s\theta_{i2\,i3} + a_{i2}s\theta_{i2} \quad (3.5)$$

$$A_z = d_{i1} \quad (3.6)$$

Este procedimiento es necesario realizarlo para cada una de las extremidades que conforman al robot y obtener las ecuaciones (3.4) -(3.6) según sea el caso.

Con las ecuaciones (3.4) -(3.6) calculadas para cada extremidad en relación con el marco de referencia local {0} se procede a realizar el análisis respecto a un marco de referencia global {w} para las 3 extremidades, el esquema cinemático se muestra en la Figura 12.

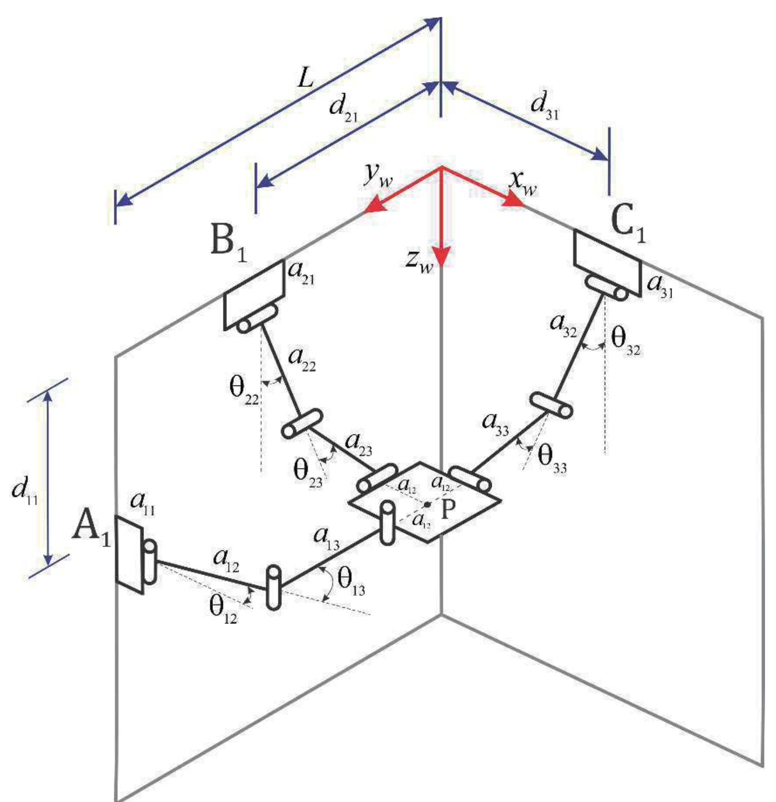


Figura12. Modelo geométrico directo del robot paralelo.

Se realiza el análisis respecto al marco de referencia global y considerando que, al unir las 3 extremidades mediante el efector final, el ángulo $\theta_{i4,i4,i4}$ se mantiene constante debido a las restricciones del efector final, entonces las ecuaciones (3.3) - (3.6) se reducen a:

Para la extremidad i-esima:

$$A_x = a_{i4} + a_{i3}c\theta_{i2\,i3} + a_{i2}c\theta_{i2} + a_{i1} \quad (3.7)$$

$$A_y = L - a_{i4} - a_{i3}s\theta_{i2\,i3} - a_{i2}s\theta_{i2} \quad (3.8)$$

$$A_z = d_{i1} \quad (3.9)$$

Para cada extremidad (A, B, C) que se presenta en la figura 12 se obtienen las siguientes ecuaciones que se utilizan para conocer la posición del efector final.

Para la extremidad A:

$$A_x = a_{14} + a_{13}c\theta_{12\,13} + a_{12}c\theta_{12} + a_{11} \quad (3.10)$$

$$A_y = L - a_{14} - a_{13}s\theta_{12\,13} - a_{12}s\theta_{12} \quad (3.11)$$

$$A_z = d_{11} \quad (3.12)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para la extremidad B:

$$B_x = a_{24} + a_{23}s\theta_{22\,23} + a_{22}s\theta_{22} \quad (3.13)$$

$$B_y = d_{21} \quad (3.14)$$

$$B_z = a_{24} + a_{23}c\theta_{22\,23} + a_{22}c\theta_{22} + a_{21} \quad (3.15)$$

Para la extremidad C:

$$C_x = d_{31} \quad (3.16)$$

$$C_y = a_{34} + a_{33}s\theta_{32\,33} + a_{32}s\theta_{32} \quad (3.17)$$

$$C_z = a_{34} + a_{33}c\theta_{32\,33} + a_{32}c\theta_{32} + a_{31} \quad (3.18)$$

3.2. Deducción del Modelo Geométrico Inverso (MGI)

El método de accionamiento lineal aplicado en la arquitectura propuesta, un actuador lineal acciona la articulación prismática en cada extremidad donde el resto de las articulaciones son pasivas. Este método tiene la ventaja de distribuir los actuadores en la base fija, tal que, cada variable articular actuada se desplace en un eje $(X,\ Y$ o $Z)$. Para el análisis cinemático inverso existe una correspondencia uno a uno entre la posición del efector final y los desplazamientos de la articulación de entrada.

En la Figura 13 se muestra que cada extremidad tiene asociado un punto P en un plano, el cual pasa a través de los puntos A_1, B_1, C_1 y es perpendicular al eje de la articulación lineal que es accionada mediante un actuador lineal.

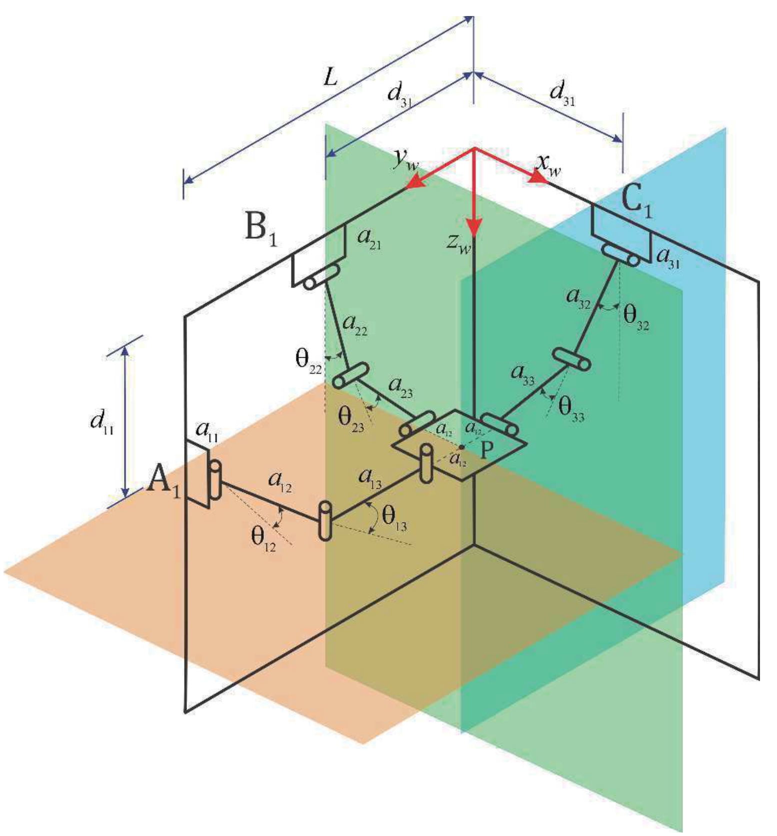


Figura 13. Método de accionamiento lineal.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



De lo anterior se puede determinar una relación de cinemática inversa, con la cual al conocer la posición deseada que está acotada por (P_x, P_y, P_z) se puede determinar la posición, velocidad y aceleraciones de los actuadores (d_{31}, d_{21}, d_{11}), los cuales tienen una relación uno a uno, quedando expresado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{21} \\ d_{11} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_{31} \\ \dot{d}_{21} \\ \dot{d}_{11} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{d}_{31} \\ \ddot{d}_{21} \\ \ddot{d}_{11} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

3.3. Deducción de matriz Jacobiana.

La relación entre las velocidades de entrada y las velocidades de salida en el efector final están dadas por la ecuación (3.24). El método de ecuación de velocidad de lazo cerrado es utilizado para determinar la matriz Jacobiana del manipulador.

$$\dot{\boldsymbol{q}} = J\dot{\boldsymbol{x}} \quad (3.24)$$

Dado que el manipulador tiene 3 grados de libertad de traslación, el vector de velocidades de salida en el efector final está definido por:

$$\boldsymbol{V}_p = \left[v_{px}, v_{py}, v_{pz}\right]^T \quad (3.25)$$

y el vector de velocidades entrada es:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \left[\dot{d}_{11}, \dot{d}_{21}, \dot{d}_{31}\right]^T \quad (3.26)$$

La velocidad del efector final $\boldsymbol{V}_p$ está definida por la ecuación de cada lazo cerrado como:

$$\boldsymbol{V}_p = \boldsymbol{V}_{i1} \; + \; \boldsymbol{\omega}_{i2} \times \boldsymbol{a}_{i2} \; + \; \boldsymbol{\omega}_{i3} \times \boldsymbol{a}_{i3} \quad (3.27)$$

De la expresión anterior $(\boldsymbol{\omega}_{ij} \times \boldsymbol{a}_{ij})$ es la derivada del vector de posición $\boldsymbol{a}_{ij}$.

$$\frac{d\boldsymbol{a}_{ij}}{dt} = \dot{\boldsymbol{a}}_{ij} = \boldsymbol{\omega}_{ij} \times \boldsymbol{a}_{ij}$$

Eliminando las velocidades de las articulaciones pasivas considerando la propiedad $(\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) \times (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{b}) = 0$ de doble producto cruz, al multiplicar ambos lados de la ecuación (4.32) por $(\boldsymbol{a}_{i2} \times \boldsymbol{a}_{i3})$, la ecuación de velocidad del efector final se reduce a:

$$(\boldsymbol{a}_{i2} \times \boldsymbol{a}_{i3}) \cdot \boldsymbol{V}_p = \boldsymbol{V}_{i1} \cdot (\boldsymbol{a}_{i2} \times \boldsymbol{a}_{i3}) \quad (3.28)$$

Donde:

$$\boldsymbol{a}_{i2} = a_{i2} \begin{bmatrix} c\theta_{i2} \\ s\theta_{i2} \\ d_{i1} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{V}_{i1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_{i1} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{a}_{i3} = a_{i3} \begin{bmatrix} c(\theta_{i2} + \theta_{i3}) \\ s(\theta_{i2} + \theta_{i3}) \\ d_{i1} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{V}_p = \begin{bmatrix} v_{px} \\ v_{py} \\ v_{pz} \end{bmatrix}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Sustituyendo las expresiones y simplificando se obtiene:

$$J_x \boldsymbol{V}_p = a_{i2}a_{i3}\begin{bmatrix} j_{1x} & j_{1y} & j_{1z} \\ j_{2x} & j_{2y} & j_{2z} \\ j_{3x} & j_{3y} & j_{3z} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{px} \\ v_{py} \\ v_{pz} \end{bmatrix} \qquad (3.29)$$

$$J_q \boldsymbol{V}_{i1} = a_{i2}a_{i3}\begin{bmatrix} J_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{q3} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{d}_{11} \\ \dot{d}_{21} \\ \dot{d}_{31} \end{bmatrix} \qquad (3.30)$$

Donde:

$$j_{ix} = d_{i1}s\theta_{i2} - d_{i1}s(\theta_{i2} + \theta_{i3})$$
$$j_{iy} = d_{i1}c\theta_{i2} - d_{i1}c(\theta_{i2} + \theta_{i3})$$
$$j_{iz} = c\theta_{i2}s(\theta_{i2} + \theta_{i3}) - s\theta_{i2}c(\theta_{i2} + \theta_{i3})$$

$$J_{q1} = c\theta_{12}s(\theta_{12} + \theta_{13}) - s\theta_{12}c(\theta_{12} + \theta_{13})$$
$$J_{q2} = c\theta_{22}s(\theta_{22} + \theta_{23}) - s\theta_{22}c(\theta_{22} + \theta_{23})$$
$$J_{q3} = c\theta_{32}s(\theta_{32} + \theta_{33}) - s\theta_{32}c(\theta_{32} + \theta_{33})$$

La matriz Jacobiana se valida cuando $JJ(\boldsymbol{V}_p) = 0$, donde $\boldsymbol{V}_p$ corresponde al vector de velocidades del efector final.

3.4 Determinación de singularidades

Debido a la existencia de 2 matrices Jacobianas, se dice que un manipulador paralelo está en una configuración singular cuando J_x o bien J_q o ambas son singulares [10]. Existen diferentes tipos de singularidades.

a) Singularidades de la cinemática inversa

Una singularidad de cinemática inversa ocurre cuando el determinante de J_q es igual a cero. Esto es:

$$\det(J_q) = 0 \qquad (3.31)$$

Donde J_q es singular y el espacio nulo de J_q no está vacío, existen algunos vectores $\dot{\boldsymbol{q}}$ diferentes a cero que resultan en vectores $\dot{\boldsymbol{x}}$ cero.

El movimiento infinitesimal de la plataforma móvil en ciertas direcciones no puede ser realizado. Por lo tanto, el manipulador pierde uno o más grados de libertad. Por otro lado, en la configuración singular de cinemática inversa, un manipulador paralelo puede resistir fuerzas en algunas direcciones con fuerzas o torques del actuador igual a cero. Las singularidades de la cinemática inversa normalmente ocurren en la frontera del espacio de trabajo.

b) Singularidades de la cinemática directa.

Una singularidad de cinemática directa ocurre cuando el determinante de J_x es igual a cero. Esto es:

$$\det(J_x) = 0 \qquad (3.32)$$

Asumiendo que en la presencia de tal condición singular el espacio nulo de J_x no es vacío, existen algunos vectores $\dot{\boldsymbol{x}}$ diferentes de cero que resultan en vectores $\dot{\boldsymbol{q}}$ igual a cero. La plataforma móvil puede poseer movimiento infinitesimal en algunas direcciones mientras que todos los actuadores son completamente bloqueados. Por lo tanto, la plataforma móvil gana uno o más grados de libertad. Esto es una contradicción respecto a un manipulador serial, el cual pierde uno o más

ISBN: 978-607-9394-14-1.



grados de libertad. En otras palabras, en una configuración singular de cinemática directa, el manipulador no puede resistir fuerzas o momentos en algunas direcciones.

Se analizan las singularidades de cinemática inversa cuando $\det(J_q) = 0$. Considerando la ecuación (3.31), se tiene que:

$$\det(J_q) = \begin{bmatrix} J_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & J_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & J_{q3} \end{bmatrix} = 0$$

Donde:

$$J_{q1} = c\theta_{12}s(\theta_{12} + \theta_{13}) - s\theta_{12}c(\theta_{12} + \theta_{13})$$
$$J_{q2} = c\theta_{22}s(\theta_{22} + \theta_{23}) - s\theta_{22}c(\theta_{22} + \theta_{23})$$
$$J_{q3} = c\theta_{32}s(\theta_{32} + \theta_{33}) - s\theta_{32}c(\theta_{32} + \theta_{33})$$

Al calcular el determinante de la matriz de coeficientes, se obtiene:

$$\det(J_q) = s\theta_{13}s\theta_{23}s\theta_{33} = 0$$

De lo anterior se sabe que las singularidades de cinemática inversa ocurren cuando $\theta_{i3} = 0° = 180°$ para $i = 1,2,3$.

Físicamente las singularidades ocurren cuando las extremidades están completamente extendidas o cuando la pose del manipulador provoca que colisionen los eslabones a_{i2} y a_{i3} para $i = 1,2,3$.

3.5 Simulación

Para comprobar el posicionamiento del Robot en el espacio se puede hacer uso de herramientas computacionales que ayuden a los cálculos de la cinemática, en las imágenes siguientes se presenta una simulación en MATLAB para visualiza el posicionamiento. Se presentan diferentes puntos en la tabla 3, las unidades están en mm, en color verde podemos visualizar las extremidades del robot, en color negro se representa la estructura fija que soporta al Robot.

Tabla 3. Puntos simulados con sus respectivos ángulos obtenidos.

Punto	X	Y	Z	Ángulos Extremidad 1		Ángulos Extremidad 2		Ángulos Extremidad 3		Figura
1	250	250	250	90	90	90	90	90	90	14
2	400	400	200	-41.51	20.41	41.52	20.41	-20.41	41.52	15
3	100	100	200	36.86	0	36.86	0	41.51	-20	16

ISBN: 978-607-9394-14-1.



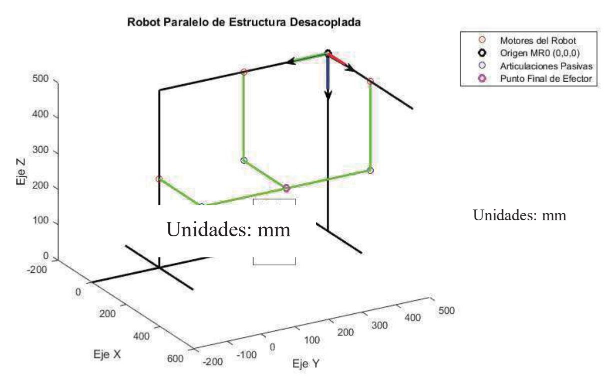


Figura 14. Punto 1

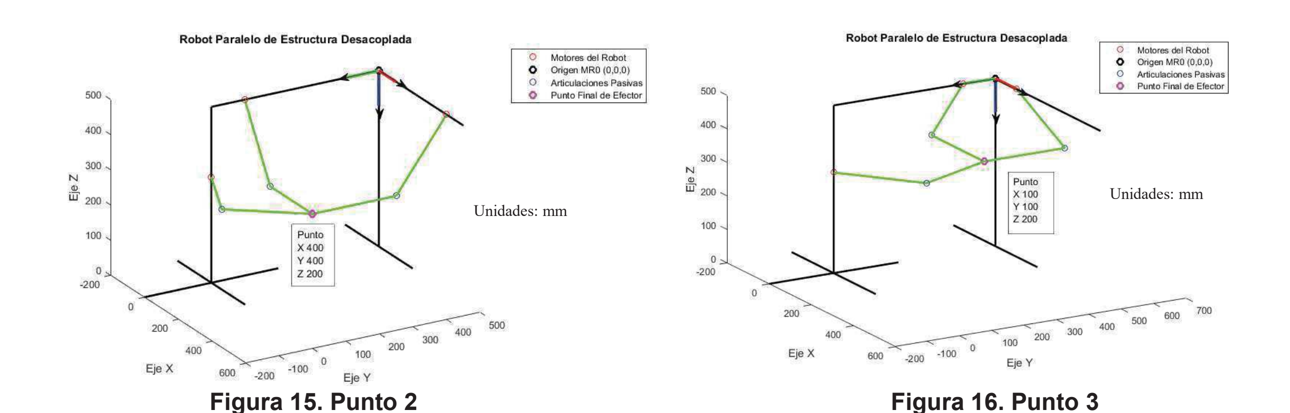


Figura 15. Punto 2

Figura 16. Punto 3

4. Conclusiones.

Como resultado del proceso de diseño es posible concluir que la arquitectura utilizada para el robot es adecuada para realizar movimientos en el espacio aprovechando toda el área de trabajo sin llegar a singularidades que afecten el movimiento del robot.

A diferencia de otras arquitecturas de mecanismo paralelo donde los actuadores son montados en la base fija, el mecanismo utilizado permite distribuir los actuadores en los ejes X, Y ó Z, esto permite facilitar la implementación de rutinas de movimiento debido a la simplicidad de la cinemática inversa.

El diseño propuesto para las extremidades presenta ventajas como evitar colisiones entre los eslabones. Esto permite aprovechar totalmente el espacio de trabajo del robot.

Es posible concluir que la arquitectura presentada tiene potencial para la fabricación y su introducción en procesos industriales debido a la sencillez en su cinemática inversa y al aprovechamiento del espacio de trabajo sin llegar a singularidades.

5. Referencias.

[1] Clavel, R. Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté. Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland, 1991.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[2] Pierrot, Marquet & Company. H4 parallel robot: Modeling, design and preliminary experiments. Université Montpellier. 2001.

[3] Li, W., Zhang, J. & Gao, F. R-CUBE, A Decoupled Parallel Robot Only with Revolute Joints. Hebei University of Technology, China. Mechanism and Machine Theory. 2007.

[4] Kim & Tsai. Evaluation of a parallel manipulator. Advances in robot kinematics: Theory and applications. 2002.

[5] Pashkevich, A., Chablat, D., Wenger, P. The Orthoglide: Kinematics and Workspace Analysis. Nantes, France Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, 2007.

[6] Li, W., Zhang, J. & Gao, F. P-CUBE, A Decoupled Parallel Robot Only with Prismatic Pairs. Hebei University of Technology, China. 2006.

[7] Gosselin, C. Forward displacement analysis of a quadratic 4-DOF 3T1R parallel manipulator: The Quadrupteron. Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland. 2009

[8] Gogu, G. Structural synthesis of fully-isotropic parallel robots with Schönflies motions via theory of linear transformations and evolutionary morphology. European Journal of Mechanics. 2007.

[9] Briot, S. y Bonev, I. Pantopteron-4: A new 3T1R decoupled parallel manipulator for pick and place applications. Mechanism and Machine Theory. 2010.

[10] Tsai, Lung-Wen. Robot Analysis: The mechanism of serial and parallel manipulators. John Wiley & Sons, Inc. 1999.

[12] Gogu, G. T2R1-type Parallel Manipulators with Decoupled and Bifurcated Planar-Spatial Motion of the Moving Platform. Blaise Pascal University and French Institute of Advanced Mechanics. 2009.

[13] The Boston Consulting Group ,Takeoff in Robotics Will Power the Next Productivity Surge in Manufacturing,February 10, 2015

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño Conceptual de un Sistema Informático de Comparación de Precios de la Canasta Básica

Guzmán Ortega Lorena Wendolyn, Ortiz Rodríguez Fabián, Valencia González Laura Lizbeth, Hernández Lara Derlis y Manzano Osornio Víctor Iván

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
División de Informática
Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

Este trabajo presenta la implementación de un sistema comparativo de precios y marcas de productos de consumo masivo, que atiende la necesidad de contribuir a la ayuda de la economía y reducción de tiempo de las personas, al momento de comprar los productos deseados, con el objetivo de agilizar la selección de productos dependiendo del mejor precio ofertado. Al implementar el sistema de comparación de precios se le dará al usuario mayor apreciación de las diferentes opciones que existan. Se hace uso de la metodología QFD (por sus siglas en inglés, ***Quality Function Deployment****) aplicada al diseño en ingeniería para obtener un diseño conceptual óptimo. La mecatrónica es un área multidisciplinar, ya que incorpora elementos de la electrónica, la mecánica, robótica, informática y manufactura, este trabajo en su gran mayoría muestra contenido informático, relacionándose también con la parte electrónica, ya que se utilizara un sensor de lectura, que en este caso será la cámara del dispositivo móvil a utilizar.*

Palabras clave: Sistema informático, comparación de precios.

1. Introducción

La transformación ocurrida en la sociedad recientemente debido al avance tecnológico en el campo informático ha venido cambiando radicalmente las formas de organizaciones y los procesos de trabajo.

La tecnología y el equipamiento para la utilización de códigos de barras en los diferentes procesos de compras, ha alcanzado el desarrollo suficiente para demostrar los beneficios y aplicaciones en el uso de la identificación de productos, marcas y precios; siendo esto lo suficientemente flexible para ser manipulado por el usuario. La figura 1 muestra un ejemplo del uso de este sistema.

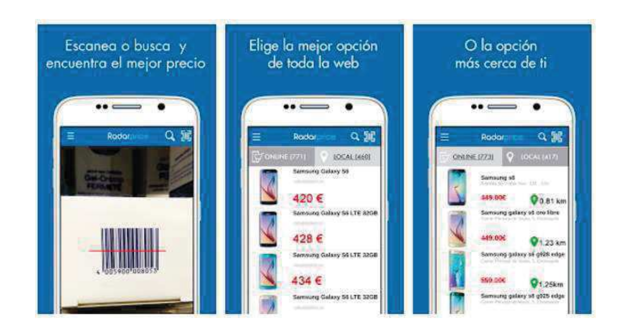


Figura 1: Ejemplo de interfaz para identificación de productos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para el proceso de diseño conceptual se hace uso de la metodología QFD (Despliegue de la Función de calidad), que conlleva identificar la necesidad del cliente, sus requerimientos y por consecuencia la determinación da la solución óptima al problema planteado.

Tomando en cuenta el artículo del Economista podemos mencionar que la canasta básica, es entendida como un subconjunto de productos incluidos en el cálculo del Índice Nacional de Precios al Consumidor, es un conjunto de 82 productos, los cuales son determinados con base en la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH), por el Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI) [8].

Se menciona que de acuerdo con el documento titulado "Índice Nacional de Precios al Consumidor; Ponderadores y factores de encadenamiento nacionales y subíndices que lo componen conforme a la clasificación por objeto del gasto (8 grupos)", y en cuyas acotaciones se menciona que es "Vigentes a partir de la 1ª quincena de abril de 2013", obtenido de la página del INEGI.

1.1 Antecedentes

Silver, B. (1948), un estudiante de ciencias de Estados Unidos, almorzando en un local de comidas rápidas escuchó la conversación de unos empresarios preocupados por agilizar el recuento de productos y la facturación en la línea de cajas. Comenzó a trabajar junto a su amigo Joseph Woodland en una idea de patrones de tintas sensible a la luz ultravioleta, a la que luego le añadieron el patrón de espacios y puntos del código morse. Los códigos de barras se desarrollaron a finales de los años 40 (la solicitud de patente se envió en octubre de 1949) [1].

El lector de código de barras compite en el mercado contra las ***App's*** desarrolladas para dispositivos móviles y lectores de código de barras inalámbricos. Existen ya algunos escáneres de códigos de barras que se utilizan a través de ***bluetooth*** como se muestra en la figura 2. App: **Aplicación** es un término que proviene del vocablo latino ***applicatĭon*** y que hace referencia a la **acción y el efecto de aplicar o aplicarse** (poner algo sobre otra cosa, emplear o ejecutar algo, atribuir) [7].



Figura 2. Android como escáner de código de barras inalámbrico.

1.1.2 Lector de código de barras asequible

La App Escáner Inalámbrico, convierte su dispositivo móvil Android en un escáner de código de barras profesional**,** con funciones de comunicación. La App es ideal como alternativa económica de los escáneres de código de barras inalámbricos. Escanea códigos de barras lineales y códigos de barras 2D de forma rápida y fiable.

Su conexión con diversos sistemas está garantizada. Puede disponer de los códigos de barras escaneados mediante las siguientes tecnologías y protocolos: ***Bluetooth***, TCP/IP, ***WebSocket*** [2].

2. Desarrollo

Para la generación del concepto ganador, se empleó la metodología de Despliegue de la Función de Calidad. El QFD es una práctica para diseñar los procesos en respuesta a las necesidades de los clientes, además traduce lo que el cliente quiere en lo que la organización produce. Le permite a

ISBN: 978-607-9394-14-1.



una organización priorizar las necesidades de los clientes, encontrar respuestas de innovación a esas necesidades, y mejorar procesos hasta una efectividad máxima [3].

Determinación de las expectativas y requerimientos del cliente:

1. Identificación de la necesidad

Necesidad: Optimizar tiempo y costos de las personas, en cuanto a la selección y compra de productos de consumo masivo.

Objetivo: Implementar un sistema de comparación de precios de productos de consumo masivo mediante una ***App***.

Objetivos específicos:

- Revisar cuáles son las condiciones de plataforma tecnológica en ***Hardware*** y ***Software*** para implementar la herramienta de lector de código de barras.
- Plantear requerimientos específicos a cumplirse para que una empresa que no sea un operador logístico pueda aprovechar esta herramienta.
- Obtener el diseño conceptual, e implementar en el diseño a detalle.

Planteamiento del problema: En las últimas décadas se ha registrado una creciente en los gastos económicos de los consumidores de diversos tipos de productos en los supermercados. Por tal motivo se busca disminuir en lo posible los tiempos y gastos de los usuarios con relación a los productos.

Estos incluyen situaciones tan comprometedoras como identificar adecuadamente la calidad y el precio de los productos para beneficio del usuario. Innumerables han sido las estrategias que se han diseñado y se continúan desarrollando para implementar estas propuestas como lo han sido distintos sistemas de código de barras basados y creados por distintas necesidades de las personas, resaltando entre ellas la aplicación de tecnologías de la información (TI), por lo que se quiere hacer una breve reflexión sobre la aplicación del escaneo código de barras para mejorar y agilizar los procesos de compras de los usuarios utilizando experiencias perfectamente validadas y con resultados satisfactorios.

Basado en lo anterior es que este estudio pretende dar a conocer la problemática existente, en relación con la ausencia de un sistema de código de barras en la vida cotidiana de la población proponiendo a los usuarios de dicho sistema una mejora en la comparación y selección de productos. Con motivo al problema planteado se estableció que el diseño de un sistema comparativo de precios mediante una lectura de los códigos de barras de estos, así mismo, que este cumpla con los requerimientos del cliente [4].

Justificación: Al implementar el sistema de comparación, los usuarios se verán beneficiados ya que dicho sistema permitirá una reducción del tiempo en la elección del precio adecuado de los productos deseados.

Se establecen los requerimientos por el cliente:

-Fácil instalación.
-Manipulación de la aplicación con facilidad.
-Costo accesible.
-Práctico y atractivo con colores conservadores.
-Fiable y cómodo.
-Contenga información del producto (precio-distancia).
-Pueda utilizarse en varios tipos de celulares.
-Actualizaciones periódicas.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1 Muestreo de los requerimientos del cliente.

Para la elaboración de este muestreo se tomó en cuenta un estudio presentado por El financiero en el cual menciona que las personas que visitan las tiendas comerciales con mayor frecuencia son, un 85% Mujeres y, en el caso de los hombres, el porcentaje baja a un 81%.

También un 61% de quienes compran en centros comerciales prefieren hacerlo entre semana y solo un 43% durante el fin de semana. Esto es porque entre se mana hay más ofertas que un fin de semana.

Por el contrario, hay quienes no saben de ofertas y compran el producto a un alto precio, cuando al otro día ya está ofertado.

Para la deducir la cantidad que cuestionarios que se realizarían, se utilizó la fórmula para calcular el tamaño de muestra, cuando se conoce el tamaño de la población es la siguiente.

$$n = \frac{\dfrac{Z^2 * p\,(1 - p)}{e^2}}{1 + \dfrac{(z^2 * p\,(1 - p)}{e^2 N}}$$

En donde:

N = Tamaño de la población (**1, 677,678**)

Z = Nivel de confianza que se desee siendo 99% el valor más alto (este valor equivale a 2.58) y (1.65) el valor mínimo aceptado para considerar la investigación como confiable.

P = probabilidad de éxito, o proporción esperada (por default es 0.5)

e = representa el limite aceptable de error muestral, generalmente va de 1% (0.01) al 10% (0.1) el valor estándar usado en las investigaciones

Una vez que los valores están establecidos, realizaremos la sustitución de los valores y aplicación de la fórmula para obtener el tamaño de la muestra poblacional correspondiente al universo finito determinado.

$$n = \frac{\dfrac{1.65^2 * 0.5\,(1 - 0.5)}{0.1^2}}{1 + = \dfrac{1.65^2 * 0.5\,(1 - 0.5)}{0.1^2 \;\; 1,\;\; 677,678}}$$

Ingresamos los datos a la formula.

$$n = \frac{\dfrac{2.7225 \;* 0.5\,(0.5)}{0.01}}{1 + = \dfrac{2\;7225 \;* 0.5\,(0.5)}{0.01 * \;1,\;\; 677,678}}$$

Continuamos realizando los cálculos y obtenemos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$n = \frac{\frac{2.7225 \ * 0.25}{0.01}}{1 + = \frac{2\ 7225 \ * 0.25}{0.01 * \ 1, \ \ 677, 678}}$$

Realizamos las divisiones correspondientes.

$$n = \frac{\frac{0.680625}{0.01}}{1 + = \frac{0.680625}{1, \ \ 0000004057}}$$

Finalmente obtenemos el siguiente resultado.

$$n \ = \frac{68.0625}{1, \ \ 0000004057}$$

Resultado= $n = 68.0624$

Al elaborar dicho proceso se dedujo que la cantidad de cuestionarios que se realizaran serán 68. Para este cuestionario se hicieron las siguientes preguntas.

Cuestionario

1.- ¿Conque frecuencia visitas algún supermercado?

a) Diario
b) Regularmente
c) Inusualmente

2.- ¿Cuál de los siguientes supermercados es el que más visitas?

a) Wal-Mart
b) Bodega Aurrera
c) Soriana
d) Cualquiera de los anteriores

3.- ¿Has comprado algún producto a precio normal, sin darte cuenta que en otra tienda comercial está en oferta o más abarata?

Si
No

4.- ¿Al darte cuenta desearías haber podido comprar el producto más barato o el que estaba en oferta?

Si
No

5.- ¿Crees que es importante ahorrar dinero, comprando productos más baratos?

Si
No

6.- Si existiera una aplicación la cual le ayude a los usuarios a poder visualizar en la pantalla de su celular, los precios de los distintos productos de la canasta básica, las diferentes tiendas más cercanas así como la opción para poder escanear el código del producto del cual desea saber su**¿Usted lo compraría?**

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Si

No

7.- ¿Cree que esta aplicación lo beneficiaría e incluso en ahorrar tiempo?
Si
No

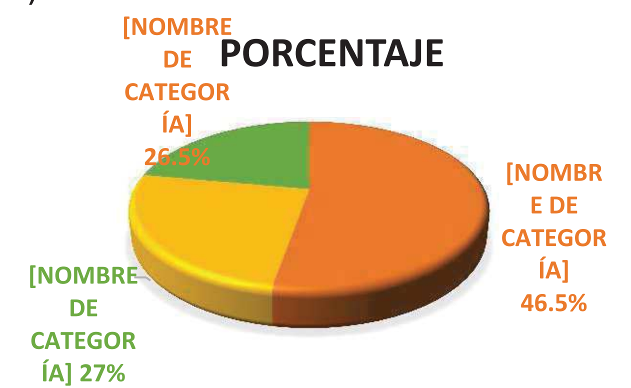
Del cuestionario presentado anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados.

La encuesta se aplicó, tanto a hombres como a mujeres entre un rango de 22 – 40 años de los cuales el 32.5% son hombres y el 67.3% mujeres.



Sexo	Numero	Porcentaje
Masculino	22	32.5%
Femenino	46	67.5%
Total	**68**	**100%**

1.- ¿Conque frecuencia visitas algún supermercado?
a) Diario
b) Regularmente
c) Inusualmente

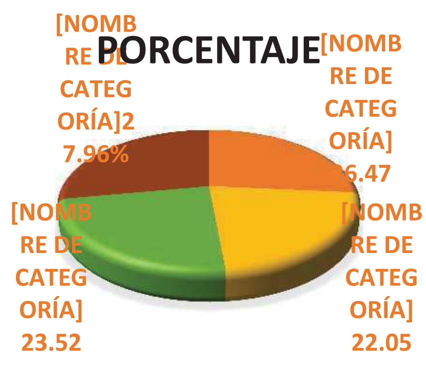


Frecuencia	Numero	Porcentaje
Diario	31	46.5 %
Regularmente	19	27%
Inusualmente	18	26.5%
Total	68	100%

2.- ¿Cuál de los siguientes supermercados es el que más visitas?
Wal-Mart
Bodega Aurrera
Soriana
Cualquiera de las anteriores

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Respuesta	Numero	Porcentaje
Wal-Mart	18	26.47
Bodega Aurrera	15	22.05%
Soriana	16	23.52
Cualquiera de las anteriores	19	27.96
Total	68	100%

3.- ¿Has comprado algún producto a precio normal, sin darte cuenta que en otra tienda comercial está en oferta o más abarata?
Si
No



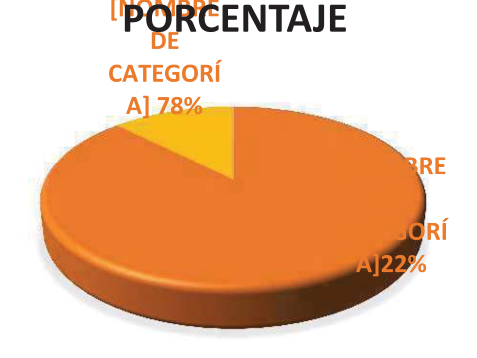
Respuesta	Numero	Porcentaje
Si	40	59%
No	28	41%
Total	**68**	**100%**

4.- ¿Al darte cuenta te molestas y desearías haber podido comprar el producto más barato o el que estaba en oferta?
Si
No



Respuesta	Numero	Porcentaje
No	23	32.5%
Si	45	67.5%
Total	**68**	**100%**

5.- ¿Crees que es importante ahorrar dinero, comprando productos más baratos?
Si
No



Respuesta	Numero	Porcentaje
No	15	22%
Si	53	78%
Total	**68**	**100%**

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.

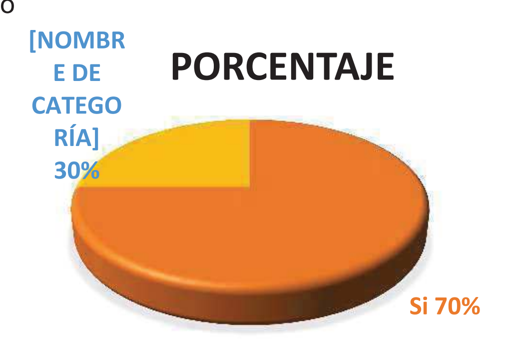


6.- Se lanzara una nueva app llamada "Sistema informático de comparación de precios de la canasta básica", esta aplicación ayudara a que los usuarios puedan visualizar en la pantalla de su celular, los precios de las tres tiendas presentadas anteriormente. Y usted podrá saber en cual tienda está más barato el producto que desea adquirir o si tiene alguna promoción **¿Usted lo compraría?**
Si
No



Respuesta	Numero	Porcentaje
Si	50	73.5%
No	18	26.5%

7.- ¿Cree que este producto lo beneficiaría e incluso en ahorrar tiempo?
Si
No



Respuesta	Numero	Porcentaje
Si	48	70%
No	20	30%
Total	**68**	**100%**

Con base a los resultados graficados, optamos por desarrollar dicha aplicación

La aplicación cumple con tres funciones:

1) Reduce la probabilidad, de que el usuario adquiera un producto con un precio más costoso

2) El usuario podrá notar si el producto está en oferta en otra tienda.

3) La app estará disponible para descargarla por medio de aplicaciones de celular inteligente

2.2 Clasificación de los requerimientos.

La clasificación permite identificar los requerimientos deseables, esto con la finalidad de determinar su importancia relativa y tomarlos en cuenta durante el diseño, esperando como resultado, la satisfacción total del cliente.

A) Requerimientos funcionales.

A1. Contener información del producto.
A2. Pueda utilizarse en varios tipos de celulares.
A3. Con opciones de sucursales cercanas.
A4. Fiable y cómodo.
A5. Manipulación de la aplicación con facilidad.
A6. Interfaz entendible y fácil acceso

B) Requerimientos físicos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



B1. Atractivo con colores conservadores.
B2. Interfaz de usuario visual con pocos botones.

C) Requerimientos de instalación.

C1. Fácil instalación.
C2. Uso de memoria

D) Requerimientos de mantenimiento.

D1. Actualizaciones periódicas.

E) Requerimientos económicos.

E1. Bajo costo.

2.3 Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables

En la tabla 1 se muestra la clasificación de los requerimientos establecidos por el cliente en obligatorios y deseables, tomando en cuenta todos los requerimientos obligatorios y tomando en cuenta los deseables se pueden establecer en el diseño como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.- Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables.

REQUERIMIENTOS.	
A) Requerimientos funcionales.	
OBLIGATORIOS.	DESEABLES.
A1. Debe tener información del producto **A3**. Que proporcione más de una sucursal cercana. **A4**. Fiable, cómodo para el usuario. **A5**. Manipulación de la aplicación con facilidad. **A6**. Interfaz entendible y fácil acceso	**A2**. Puede ser utilizados por la mayoría de los teléfonos celulares
B) Requerimientos físicos	
B1. Atractivo con colores no tan llamativos.	**B2.** Interfaz de usuario visual con pocos botones.
C) Requerimientos de instalación.	
C1. Fácil instalación.	
D) Requerimiento de mantenimiento.	
	D1. Actualizaciones periódicas.
E) Requerimientos económicos.	

2.4 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Los requerimientos, se tienen que llevar a un nivel de traducción cuantificable, es decir, todos aquellos requerimientos hechos por el cliente hay que definirlos en términos medibles de ingeniería, de manera que se asociarán directamente con una unidad de medición; Aquellos que no puedan ser asociados directamente a una unidad de medición, lo harán con un significado explícito, donde se referirá a la actividad que ésta implica [5].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



En esta traducción todavía no se ponen cantidades a menos que desde un principio el cliente las haya dado, de lo contrario estas se establecerán en las metas de diseño como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.- Términos mensurables de ingeniería.

Requisitos del cliente.	Términos mensurables de ingeniería.
-Fácil instalación.	-Sencillo de instalar.
-Manipulación de la aplicación con facilidad.	-Fácil manejo del sistema
-Costo accesible.	- El costo total de la máquina inferior al que pide el cliente
-Práctico y atractivo con colores no tan llamativos.	-Interface amigable para el usuario.
-Fiable, cómodo.	-Fiabilidad y confortable.
-Contenga información del producto.	-Muestre información descriptiva del producto.
-Pueda utilizarse en varios tipos de celulares.	-Portabilidad.
-Interfaz de usuario visual con pocos botones.	-Mínimas opciones requeridas.
-Actualizaciones periódicas.	-Actualizaciones necesarias e importantes.
-Con opciones de sucursales cercanas.	-Clúster de opciones según la posición geográfica.

Metas de diseño

Una vez establecidos los términos mensurables de ingeniería, se establecen las metas de diseño en donde se establecen cantidades específicas que se pretenden lograr con el diseño.

- Sencillo de instalar.
- Fácil manejo del sistema
- El costo total de la máquina inferior al que pide el cliente.
- Practico con diseño atractivo al usuario
- Fiabilidad y confortable.
- Muestre información descriptiva del producto y su cercanía.
- Sea flexible con otros dispositivos celulares.
- Actualizaciones continuas.

2.5 Función global de servicio

La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño describe el papel a desempeñar del mismo, la cual consta que el sistema de comparación realice las peticiones que el cliente pide al momento de escanear el articulo el usuario podrá visualizar los diferentes precios, así como las marcas del producto escaneado brindando la facilidad al cliente de poder escoger que producto le conviene más, (véase diagrama 1).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 29, pp. 361-377.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.6 Funciones de servicio

Son todas aquellas funciones que serán realizadas por el sistema que se va a diseñar para dar solución a la necesidad planteada, y que pueden ser globales o de uso, las funciones para el presente proyecto se muestran en la figura 3.

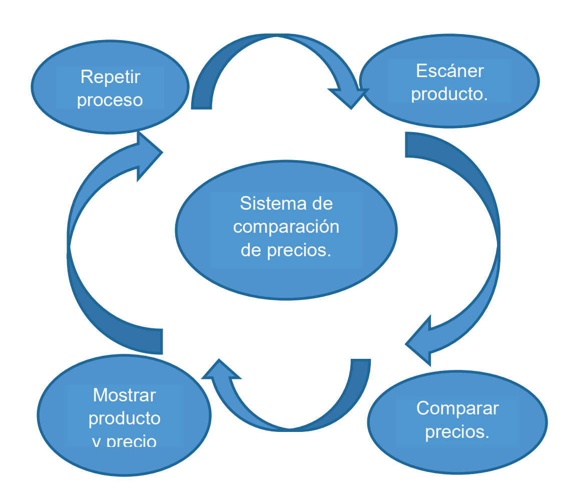


Diagrama 1. Función global.

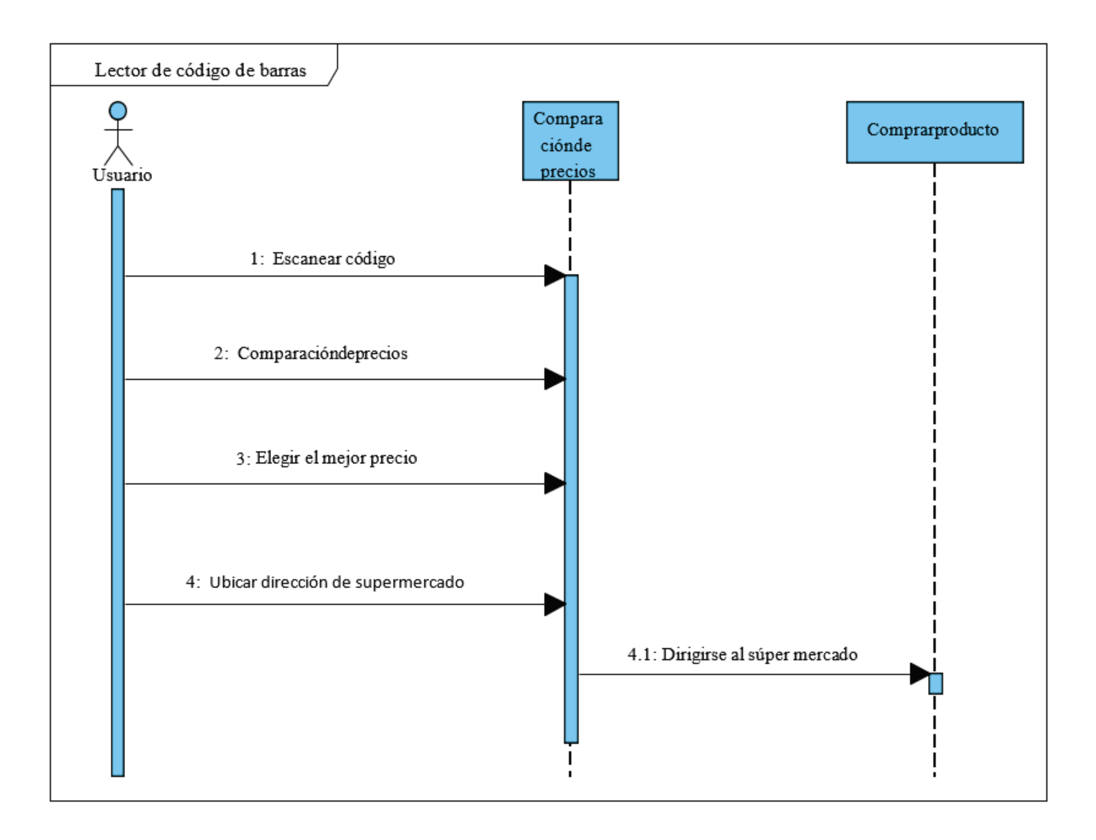


Figura 3. Funciones del servicio.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.7 Análisis funcional

El análisis funcional detalla todas las funciones que el sistema deberá realizar para cumplir con la función principal, se desglosa en la función global, funciones primarias, secundarias, terciarias, etc., Hasta llegar a los “¿con que?” para dar solución a cada función que se debe realizar para cumplir con el objetivo deseado, como se muestra en el diagrama 2.

Se tiene como función global escanear el código de barras del producto mediante el sistema de comparación las acciones que este realizará serán escanear, comparar, mostrar y repetir el proceso. Cada una de estas funciones cumple con el propósito de la comparación.

“Sistema de comparación de precios mediante Lectura de Código de Barras”

Escanear producto.
Leer código de barras
Buscar el producto escaneado

Comparar precios.
Recibir la petición
Verificar base de datos
Comparar código
Devolver resultado

Mostrar precios y productos
Colocar posibles resultados en pantalla

Repetir proceso
Salir de la búsqueda
Volver a escanear

Diagrama 2. Análisis funcional.

2.8 Generación y evaluación de conceptos

Una vez establecido el análisis funcional se proponen soluciones para resolver cada función, esto mediante una tormenta de ideas y así se generan los conceptos que darán forma al sistema o máquina a diseñar, los conceptos para este proyecto se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.- Generación de conceptos.

Funciones	A
Instalar aplicación para que lea el código de barras.	Teléfono Celular.
Almacenar en una base de datos, los códigos de barras.	Servidor.



Después se generan ideas para dar solución a cada concepto y se evalúan mediante tres filtros, de disponibilidad tecnológica, viabilidad y con base en los requerimientos del cliente, por último, los conceptos que pasaron los filtros se evalúan mediante una matriz de decisión para obtener el concepto ganador, que es las especificaciones de cómo será el diseño del sistema.

2.9 Concepto ganador

El concepto ganador está formado por una aplicación que se instalará en un celular y este mismo podrá escanear el código de cada producto. En la nube es donde se almacenarán los precios de cada producto y así podrá llegar la información necesaria por medio de la aplicación, como se muestra en las figuras 4, 5 y 6 respectivamente.

2.10 Pseudocódigo:

En el siguiente pseudocódigo se explica el algoritmo que se empleó en el desarrollo del sistema de información de comparación:

1. **Inicio**
    - Iniciar variables del código.
    - Solicita ingreso de código de barras.
    - Leer código de barras.
    - Guardar valor en variable código.
    - Realizar consulta en base de datos de la variable guardada.
    - Si el código fue encontrado.
2. **Entonces**
    - Escribe resultados de consulta.
    - Si no se encuentra código.
3. **Entonces**
    - Escribe mensaje sin resultados.
    - Se repite el ciclo.
4. **Fin**

2.11 Descripción general del funcionamiento de la aplicación.

La captura de la información se realiza a través de la cámara de nuestro celular, mediante la codificación de la aplicación en Android studio se dan las instrucciones necesarias para que al identificar el código de barra este pueda ser decodificado mostrando el código numérico que identifica a cada producto y mediante este se realice la consulta de la información sin embargo, en caso de que el código de barras se encuentre deteriorado o en mal estado y no pueda ser identificado por la aplicación, se tiene la opción de ingresar el código numerado de manera manual. La información de cada producto se encuentra almacenada en una base de datos alojada en un servidor propio, contratado mediante un servicio de hosting en lievanosan con un espacio en disco de 20GB y un ancho de banda ilimitado. Debido a las características de nuestro servidor la base de datos es capaz de almacenar una gran cantidad de productos.

El usuario de la aplicación puede consultar un número indefinido de productos según lo requiera. Y en caso de no se encuentre registrado el podrá actualizar la información.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



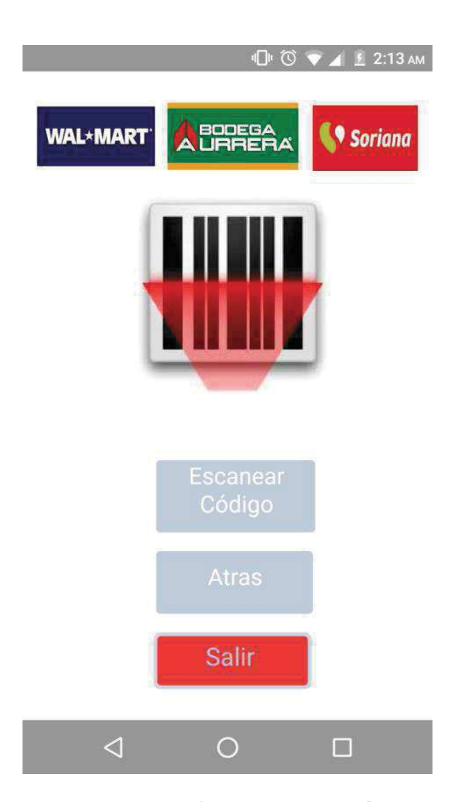


Figura 5. Interfaz escanear código.



Figura 6. Interfaz mostrando el precio del producto en distintas localidades.



Figura 4. Interfaz de usuario, selección de zona.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.12 Diagrama de flujo.

Inicio

Iniciar sesión

Colocar código de barras en el centro de la vista de la cámara.

Ingresar código manualmente

Leer código

Consultar informacion del código en la base de datos

Registrar información en la base de datos

¿El código está registrado?

Mostrar información del producto

Fin

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.13 Pruebas.

Se realizaron algunas pruebas básicas con una interfaz sencilla, en la cual se muestra el botón de escanear código en la figura 5, el cual después de ser presionado por el usuario se le manda directamente a la cámara de su dispositivo con la cual, como se muestra en la figura 6 el código del producto seleccionado podrá ser escaneado, devolviendo el código numérico que identifica a cada producto y mediante este se realice la consulta de la información.



Figura 5. Interfaz de usuario con botón de escanear código.



Figura 6. Escaneo de código mediante cámara de dispositivo móvil.

3. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló la metodología QFD, con el objetivo de obtener un diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos obligatorios del cliente y la mayoría de los deseables.

Esta metodología conlleva identificar la necesidad del cliente y sus requerimientos. Después, se clasifican los requerimientos en obligatorios y deseables, luego se procede a la traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería a fin de establecer metas de diseño, generar y evaluar conceptos adecuados para resolver la necesidad, esto a través de filtros de factibilidad, disponibilidad tecnológica, las necesidades del cliente y matrices de decisión, culminando con la determinación del concepto ganador, el cual debe dar solución a la necesidad planteada desde un principio. Además, se observó que los códigos de barra son un sistema que permiten la identificación de unidades comerciales y logísticas de forma única, y por medio de un dispositivo móvil, el cual hoy en día está al alcance de cualquier persona, se implementó esta aplicación de gran utilidad para la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



comparación de precios de la canasta básica basándose en elementos informáticos de ***hardware*** y ***software***.

4. Referencias

[6] Bahena Gómez , A. A., Hernández Lara , D., Jiménez Hernández, R., & Flores Herrera, L. A. (2010). Automatización del proceso de galvanizado. México : UNAM.

[5] Bahr, B. (2017). Examples in commercial applications . En B. Bahr, Prototyping of user intefaces for mobile applications (pág. 23). Berlin, Alemania: Springer.

[2] Campos, G. d. (s.f.). Sistemas stock. Obtenido de http://www.gustavodcampos.com/castellano/sistemastock.php

[3] Cintas, P. G. (1995). Tecnicas para la getion de la calidad. Madrid, España: Diaz de Santos.

[8] La Econimia. (Mayo de 2016). Obtenido de La canasta basica: http://laeconomia.com.mx/la-canasta-basica/

[7] Pelegrí Santamaría, F. (2007). Lectura y gestión de códigos de barras. Tarragona: Rovira Virgili.

[4] Zaidi, A. (1993). Q.F.D. Despliegue de la funcion de calidad. Madrid, España: Diaz de Santos.

[1] Zen, C. (5 de Mayo de 2012). Historia de codigo de barras. Obtenido de http://www.codigodebarras.pe/codigo-de-barras-historia/

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 378-389.
ISBN: 978-607-9394-14-1.

Diseño Conceptual de un Sistema de Clasificación de Residuos

Mendoza Martínez Jesús Abraham, Hernández Hernández Luis Alberto, Aldaco Romero Cristopher Eduardo, Hernández Lara Derlis y Manzano Osornio Víctor Iván

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
División de Ingeniería Informática
Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

En la comunidad mexicana no se tiene la cultura de la clasificación de residuos en las casas habitacionales, por lo cual se propone incentivar esta situación mediante un dispositivo electrónico, innovador y atractivo para la sociedad en general. Se diseñó el modelo conceptual un sistema que funciona como un clasificador de residuos, dicho sistema consta de un mecanismo mediante el cual detecta el tipo de residuo, el cual se desliza por una rampa, y al final es depositado en el contenedor adecuado. El valor agregado de esta propuesta se encuentra en la posibilidad de clasificar de una manera correcta la basura y de esta forma contribuye para que el aprovechamiento de los materiales reciclables sea mayor. Para la etapa del diseño conceptual, se utilizó la metodología de despliegue de la función de calidad (QFD por sus siglas en inglés ***Quality Function Deployment)****, en la cual se consideran las necesidades del cliente y sus requerimientos, es decir que se diseña con base a la voz del cliente o los usuarios finales.*

Palabras Clave: Sistema de clasificación, reciclaje, residuos.

1. Introducción

Según los datos de la Evaluación Regional llevada a cabo por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), los latinoamericanos generamos 0.63 kg/hab./día de residuos sólidos domiciliarios (RSD). En el año de 1960 la Organización Panamericana de la Salud (OPS), adopta la primera resolución sobre desechos sólidos e invita a los Ministerios de Salud de América para que adopten tendientes a formar y fortalecer una adecuada disposición final de la basura [5].

La situación del manejo y disposición final de la basura en gran parte de los municipios en México es crítica, en la medida que su volumen de generación ha estado creciendo más rápido que la capacidad de los servicios de limpia de recolectarlos. De acuerdo con las cifras oficiales, cada mexicano desecha en promedio 920 gramos de basura por día; otros datos indican que se desecha un kilogramo y medio; el promedio urbano se sitúa en 1.2 kg, las cifras varían dependiendo del lugar donde se resida [9].

Reciclar es la mejor manera de resolver el problema de la basura. Por ello la importancia de hacer una buena separación y recolección de los desechos es importante. Si la separación en origen es correcta, la recuperación de materiales reciclables será mayor.

En general en ingeniería existen varios modelos de diseño, por ejemplo, Cross (1999) los clasifica en dos grupos: descriptivos y prescriptivos, mientras que Takeda (1990) citando a Finger y Dixon (1989) adiciona dos más: cognitivos y computacionales. Para este trabajo se utilizó el modelo de diseño planteado por Asimow (1962) que consta de dos etapas: diseño conceptual (planeación y morfología) y diseño a detalle.



El proceso de *diseño conceptual* consiste esencialmente en obtener una solución a un problema de diseño particular a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades planteadas, mientras que la fase de *diseño a detalle* corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución [8].

2. Desarrollo y/o Campo teórico

Para la obtención del diseño conceptual del prototipo, se utilizó la metodología QFD (por sus siglas en inglés *Quality Function Deployment)*, con la cual se puede llegar a un diseño funcional y competitivo, señalando que éste puede ser mejorado en la etapa de diseño a detalle. A continuación se muestran las consideraciones más significativas de dicha metodología de diseño.

3. Identificación de la necesidad

Necesidad: La separación eficiente de los residuos. Las diferentes actividades humanas modernas y el consumismo en el día a día han contribuido a acumular gran cantidad de residuos (cientos y miles de toneladas anuales), cantidad que va en aumento, en los domicilios de la ciudad se suma el incumplimiento de muchas familias de separar la basura. Reciclar es la mejor manera de resolver el problema de la basura. Por ello la importancia de hacer una buena separación y recolección de nuestros desechos es importante. Si la separación en origen es correcta, la recuperación de materiales reciclables será mayor.

Objetivo: Realizar un sistema de clasificación de residuos que funcione de una forma correcta.

Objetivos Específicos: Investigar sobre la problemática de clasificación de residuos, Analizar y seleccionar el material adecuado para construcción del prototipo, Crear un prototipo que clasifique correctamente los residuos, Realizar las pruebas de funcionamiento del mismo, Corregir si existe algún margen de error.

Planteamiento de Problema: Mala clasificación de residuos hace más difícil el reciclaje de los mismos. En México, se producen anualmente más de 100 millones de toneladas de basura, las cuales son dispuestas en rellenos sanitarios o basurales a cielo abierto. En el caso de basurales, constituyéndose en una fuente de emisión de sustancias tóxicas para el ambiente y la salud humana.

Justificación: Con la realización del sistema que clasifique los residuos de una manera adecuada, la clasificación de la basura desde su origen facilita su reusó, al no estar “contaminada” con otros desechos que podrían volverla inservible.

4. Determinación y clasificación de los requerimientos del cliente

La clasificación permite identificar los requerimientos deseables, esto con la finalidad de determinar su importancia relativa y tomarlos en cuenta durante el proceso de diseño, esperando como resultado un grado de satisfacción mayor en el cliente.

Los requerimientos presentados a continuación fueron obtenidos mediante encuestas a personas de entre 15 y 45 años aproximadamente, a quienes se les pregunto entre otras cuestiones, ¿qué características debería tener un clasificador de residuos para qué fuera funcional, novedoso y atractivo?, de las respuestas recabadas se obtuvo la siguiente información y clasificación.

a) Requerimientos Funcionales.

A1. Se introducirá el residuo en el sistema.
A2. Se identificara el tipo de residuo.
A3. Se abrirá la compuerta del contenedor dependiendo de la clasificación del residuo.
A4. El residuo será depositado en el recipiente adecuado.



A5. Una vez depositado el residuo se cerrara la compuerta del contenedor.

b) Requerimientos Físicos.

B1. El sistema tendrá cuatro contendores.
B2. Los contenedores deberán tener el tamaño para almacenar los residuos desechados.
B3. Peso Máximo de 15kg.
B4. Contenedores deben ser fáciles de retirar del sistema.

c) Requerimientos de Instalación.

C1. El sistema será de fácil colocación.

d) Requerimientos de Mantenimiento.

D1. Fácil mantenimiento.
D2. Bajo costo de mantenimiento.

e) Requerimientos Económicos.

E1. El costo de producción sea menor a 1500.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de los requerimientos establecidos por el cliente en obligatorios y deseables, con el fin de diseñar tomando en cuenta todos los requerimientos obligatorios y ver cuáles de los deseables se pueden establecer en el diseño.

Tabla 1.- Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables.

OBLIGATORIOS	DESEABLES
A1. Se introducirá el residuo en el sistema	B3. Peso máximo de 15kg
A2. Se identificara el tipo de residuo	B4. Los contenedores deben ser fáciles de retirar del sistema
A3. Se abrirá la compuerta del contenedor dependiendo de la clasificación del residuo	C1. El sistema será de fácil colocación
A4. El residuo será depositado en el recipiente adecuado	D1. Fácil mantenimiento
A5. Una vez depositado el residuo se cerrara la compuerta del contendor	D2. Bajo costo de mantenimiento
B1. El sistema tendrá cuatro contenedores	E1. El costo de producción sea menor a $1500
B2. Los contenedores deberán tener el tamaño para almacenar los residuos desechados en casas habitacionales	

Una vez identificados los requerimientos deseables se ponderan para saber su orden de importancia en el sistema y establecer cuales son más prioritarios para ser incluidos en el diseño, lo ideal es que se incluyan todos, pero esto dependerá de que no interfieran en el cumplimiento de los requerimientos obligatorios, como se muestra en la Tabla 2.

Para obtener el cálculo se utilizan dos valores de comparación.

(+). Significa que el requerimiento de comparación es más importante que los demás.
(-). Significa que el requerimiento de comparación no es más importante que los demás.

Una vez que se ha llenado la tabla 2 con los valores de comparación, se calculan los pesos relativos de cada requerimiento deseable mediante la ecuación (1), donde $\sum(+)$ es el número de veces que el requerimiento fue más importante comparado con los demás.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 30, pp. 378-389.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$Ir(\%) = \frac{\sum(+)}{Total} * 100 \quad (1)$$

Tabla 2.- Ponderación de los requerimientos deseables.

	B3	B4	C1	D1	D2	E1	∑(+)	Ir (%)
B3		+	+	-	-	-	2	13.3
B4	+		-	+	-	+	3	20
C1	-	+		+	-	-	2	13.3
D1	+	-	+		+	-	3	20
D2	-	+	-	+		-	2	13.3
E1	+	+	+	-	-		3	20
						Total	15	100.00

Se procede a realizar la tabla 3, en la cual se colocan los requerimientos deseables según el orden de importancia obtenida en la comparación de la Tabla 2.

Tabla 3.- Orden de importancia de los requerimientos deseables.

Orden de importancia	REQUERIMIENTOS DESEABLES	∑(+)	Ir (%)
1	B4. Los contenedores deben ser fáciles de retirar del sistema	3	20
2	D1. Fácil mantenimiento	3	20
3	E1. El costo de producción sea menor a $1500	3	20
4	B3. Peso máximo de 15kg	2	13.3
5	C1. El sistema será de fácil colocación	2	13.3
6	D2. Bajo costo de mantenimiento	2	13.3
	Total	15	100.00

4.1 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Los requerimientos, se tienen que llevar a un nivel de traducción cuantificable, es decir, todos aquellos requerimientos hechos por el cliente hay que definirlos en términos mensurables de ingeniería, de manera que se asociarán directamente con una unidad de medición; aquellos que no puedan ser asociados directamente a una unidad de medición, lo harán con un significado explícito, donde se referirá a la actividad que éste implica, como se muestra en la Tabla 4.

En esta traducción todavía no se pone cantidades a menos que desde un principio el cliente las haya dado, de lo contrario estas se establecerán en las metas de diseño, en las cuales una vez establecidos los términos mensurables de ingeniería, se decretan cantidades específicas que se pretenden lograr en el diseño.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 4.- Traducción a términos mensurables de ingeniería.

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS
A1. Se introducirá el residuo en el sistema	A1. Tener un orificio para introducir el residuo
A2. Se identificara el tipo de residuo	A2. Detectores de residuos
A3. Se abrirá la compuerta del contenedor dependiendo de la clasificación del residuo	A3. Compuertas en contenedores
A4. El residuo será depositado en el contenedor adecuado	A4. Residuo cae al contenedor
A5.Una vez depositado el residuo se cerrara la compuerta del contendor	A5. Cerrar puertas de contendores
B1.El sistema tendrá cuatro contenedores.	B1. Contar con los contenedores adecuados
B2. Los contenedores deberán tener el tamaño para almacenar los residuos desechados en casas habitacionales	B2. Dimensiones suficientes para almacenar un residuo
B3. Peso máximo de 15kg	B3. Utilizar material ligero y eficiente
B4. Los contenedores deben ser fáciles de retirar del sistema	B4. Fácil desmontaje de contenedores
C1. El sistema será de fácil colocación	C1. Fácil colocación
D1. Fácil mantenimiento	D1. Fácil mantenimiento
D2. Bajo costo de mantenimiento	D2. Bajo costo de manteamiento
E1. El costo de producción sea menor a $1200	E1. El costo menor a $1500

Metas de diseño:

- Se introducirá el residuo en el sistema.
- Detectores de residuos.
- Compuertas en contenedores.
- Residuo cae al contendor.
- Cerrar compuertas de contenedores.
- Contar con los contenedores adecuados cuatro.
- Dimensiones suficientes para almacenar los residuos Medidas (cm) 60 x 30 x 35.
- Utilizar material para hacer el sistema ligero máximo 1Kg.
- Fácil desmontaje de contenedores.
- Fácil colocación.
- Fácil mantenimiento.
- Bajo costo de mantenimiento.
- El costo de producción será menor a $1500.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4.2 Análisis funcional del sistema

En el análisis funcional se detalla todas las funciones que el sistema debe cumplir, para esto se delimita la función global o principal del sistema y las sub-funciones que se tienen que realizar para que ésta se pueda llevar a cabo. La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño describe el papel a desempeñar del mismo, para lo cual se apoya de funciones de servicio que son todas aquellas acciones que serán realizadas por la máquina o sistema que se va a diseñar para dar solución a la necesidad planteada, y que pueden ser globales o de uso.

En la figura 1 se puede apreciar el árbol de funciones del sistema a diseñar, en el cual la función global es la de clasificar los residuos y consta de dos sub-funciones las cuales deben de realizarse para poder cumplir con la función global y los requerimientos establecidos por el cliente.



Figura 1.- árbol de funciones del sistema.

4.3 Generación y evaluación de conceptos

Una vez establecido el análisis funcional se proponen soluciones para resolver cada función, esto mediante una tormenta de ideas, y así se generan los conceptos que darán forma al sistema o máquina a diseñar, los conceptos para este proyecto se muestran en la tabla 5.

Una vez generadas las posibles soluciones a cada una de las funciones, se tiene que realizar una etapa de evaluación, para esto se utilizan tres filtros que ayudan a obtener el diseño que contemple de mejor manera las funciones y las expectativas del cliente.

El primer filtro es el filtro de factibilidad, donde las posibles soluciones se evalúan con base en que sean elementos que puedan cumplir con las funciones y no se contrapongan con algún requerimiento obligatorio dado por el cliente, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.- Primer filtro. Evaluación por factibilidad.

FUNCIONES	A	B	C
1. Apertura de la compuerta principal	X	X	X
2. Tipo de contenedor	-	X	-
3. Apertura de las compuertas de los contenedores	X	X	X
¿Viable?	No	Si	No

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 5.- Generación de conceptos.

	Concepto		
Funciones	A	B	C
1. Apertura de la compuerta principal	Una polea que ayude a abrir las compuertas	Utilizar un servomotor que ayude a abrir compuertas	Un motor que ayude a girar la compuerta
2. Tipo de contenedor	Contenedor forma ovalada metálico	Un contenedor con forma rectangular de plástico	Contenedor forma ovalado circular
3. Apertura de las compuertas de los contenedores	Una polea que ayude a abrir las compuertas	Utilizar un servomotor que ayude a abrir compuertas	Un motor que ayude a girar la compuerta

El segundo filtro es de disponibilidad tecnológica, en el cual se verifica que todas las soluciones a las funciones sean capaces de poderse diseñar o seleccionarse con base en los conocimientos teóricos o la maquinaria actual, de donde se puede apreciar en la tabla 7 que todos los conceptos cumplen de manera adecuada con este filtro.

El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso en el concepto A una de sus funciones no cumple con las expectativas del cliente, lo cual conlleva a sustituir esa función por el elemento que se propone en C que si cumplió con este filtro y así no desechar todo el concepto A (ver tabla 8).

Tabla 7.- Segundo filtro. Evaluación por disponibilidad tecnológica.

FUNCIONES	**A**	**B**	**C**
1. Apertura de la compuerta principal	-	X	-
2. Tipo de contenedor	X	X	X
3. Apertura de las compuertas de los contenedores	-	X	-
¿Viable?	No	Si	No

Tabla 8.- Tercer filtro. Evaluación basada en los requerimientos del cliente.

FUNCIONES	**A**	**B**	**C**
1. Apertura de la compuerta de principal	X	X	X
2. Tipo de contenedor	X	X	X
3. Apertura de las compuertas de los contenedores	X	X	X
¿Viable?	Si	Si	Si

En la Tabla 9, se realizará una matriz de decisión, para la cual se necesitarán los requerimientos deseables y su calificación relativa, con lo que se obtendrá como resultado el concepto ganador, para esto se selecciona el concepto B como el concepto pivote, es decir el que servirá como punto de comparación, si un concepto cumple de mejor manera el requerimiento se colocará un signo (+), y si lo cumple de igual o menor forma se colocará un signo (-).

Partiendo de los filtros realizados en las tablas 1, 2 y 3 se combinaron los conceptos ganadores de A con los conceptos ganadores de C para hacer una comparación con B.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 9.- Evaluación basada en matrices de decisión.

Requerimientos deseables	Conceptos		
	Calificación relativa	B	AC
B4.- Los contenedores deben ser fácil de retirar del sistema	20	*	+
D1.- Fácil mantenimiento	20	*	+
E1.- El costo de producción será menor a $1500	20	*	+
B3.- Peso máximo de 10kg	13.3	*	+
C1.- El sistema será de fácil colocación	13.3	*	-
D2.- Bajo costo de mantenimiento	13.3	*	-
∑+		*	5
Peso total	100	*	77.6
Mejor concepto (Ranking)		3	1

4.4 Concepto ganador y diseño a detalle

Recordando que la fase de *diseño a detalle* corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución, basándose en la tecnología disponible se llegó al diseño siguiente:

Después de realizar los filtros correspondientes se obtiene como ganador el concepto B; además para el procesamiento de la información recibida y enviada se utilizará un microcontrolador, esto tomando en cuenta que esto no afecta drásticamente al diseño conceptual obtenido.

El diseño del dispositivo estará conformado por un contenedor en forma rectangular que tendrá en el exterior un orificio por donde se introducirán los residuos. El mecanismo que se encargara de la detección del tipo de residuo, estará al interior del contenedor, éste se colocará debajo de la ranura donde entran los residuos. Una vez que se detecte el tipo de residuo se abrirá una compuerta para que mediante una rampa inclinada este se deslice. Para cuando esto suceda ya se habrá abierto la compuerta del contenedor correspondiente dependiendo el tipo de residuo para que este caiga y sea depositado.

Para la parte de abrir y cerrar las compuertas del sistema de clasificación de residuos, se utilizarán servomotores, mientras que para detectar el tipo de residuo se ocuparan sensores (inductivos, capacitivos y opticos) las cuales recibirán y mandaran información al microcontrolador. El microcontrolador también se encontrará en el interior, el cual será alimentado por una batería de 12 volts.

4.5 Implementación del diseño obtenido

A continuación se muestran los esquemas realizados en la etapa de diseño a detalle, en la figura 2 se observa la conexión electrónica de la etapa de control del sistema para la detección y almacenamiento de los residuos; en esta figura se percibe los sensores que estarán en el orificio de introducción de residuo los cuales se encargaran de elegir en cual contenedor será almacenado, los servomotores son los encargados de abrir y cerrar tanto la compuerta principal como las compuertas de los contenedores que almacenaran los residuos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



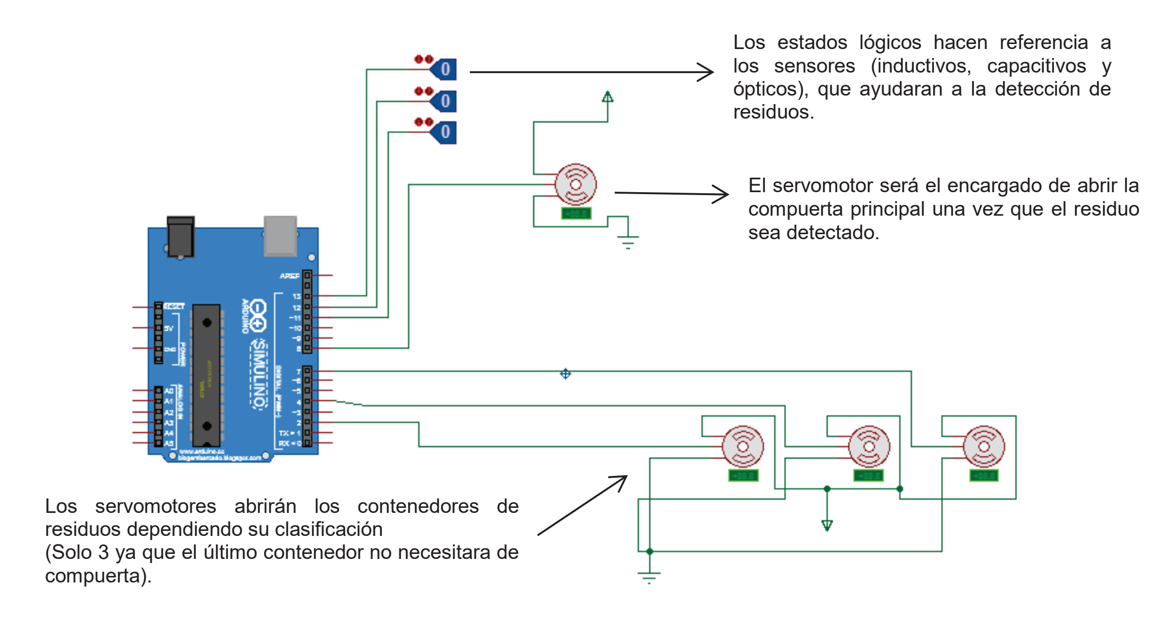


Figura 2.- Conexión del circuito electrónico para el sistema de clasificación de residuos.

A continuación, se presenta en la tabla 10, las especificaciones técnicas de los materiales a utilizar en el proyecto planteado.

Tabla 10.- Especificaciones técnicas de los materiales a utilizar.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	COSTO
Arduino UNO	• Microcontrolador ATmega328 • Voltaje de entrada 7-12V • 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM) • 6 entradas análogas • 32k de memoria Flash • Reloj de 16MHz de velocidad	$149
Sensor de proximidad inductivo	• Modelo : LJ12A3-4-Z / BY • Voltaje de Operación: DC 6-36V • Salida : PNP normalmente abierta • Detecta de objetos de metal • Distancia de detección: 4 mm • Corriente de salida : 300 mA	$86
Sensor capacitivo	• Existen sensores capacitivos de CD y CA. • Los de CD los hay de 2, 3 y 4 hilos, con distancias de sensado desde 5mm hasta 20mm • Detector de nivel de un liquido • Detección de fluidos en contenedores tal como leche en botes de cartón • Detección de barreras (por ejemplo, el agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que el plástico esto le da al sensor la habilidad de ver a través del plástico y detectar el agua	$250
Sensor infrarrojo	• Frecuencia: 433,92 Mhz hopping code • Alcance de transmisión: 80 metros sin obstáculos • Detección máxima: 12 metros / 90º; • Sensor: Doble elemento piroeléctrico	$153



Tabla 10 (cont.).- Especificaciones técnicas de los materiales a utilizar.

Servomotores de 15kg	• Modelo del producto: MG995 • Tamaño del producto: 40.7 * 19.7 * 42.9 mm • Peso del producto: 55g • Par de funcionamiento: 15KG / cm • Velocidad de reacción: 53-62R / M • Temperatura de funcionamiento: -30 ~ +60 ° • Configuración de banda muerta: 4 microsegundos • Tipo de enchufe: JR, FUTABA General • Ángulo de rotación: un máximo de 180 grados • Servo: servo • Corriente de funcionamiento: 100mA • Usando el voltaje: 3-7.2V • Materiales de construcción: dientes de metal de cobre, motor sin núcleo, doble rodamiento de bolas • Velocidad de funcionamiento sin carga: 0.17 segundos / 60 grados (4.8V); 0.13 segundos / 60 grados (6.0V)	$320
4 contenedores de basura	• Marca: RUBBERMAID • ModeloFG295500GRAY • Material de la estructura: Plástico • Material de la tapa: Plástico • Capacidad12894 L	$320
Madera Triplay	• Madera tipo triplay • 1 hoja = 2,25mts de alto largo 2.25mts ancho 5mil.	$300
	Total=	$1,578

En la figura 2 se visualiza el diseño en CAD (dibujo asistido por computadora) del sistema de clasificación de residuos desde una vista frontal en la que se aprecia los contenedores por colores (dependiendo su clasificación) y el orificio de introducción de los residuos

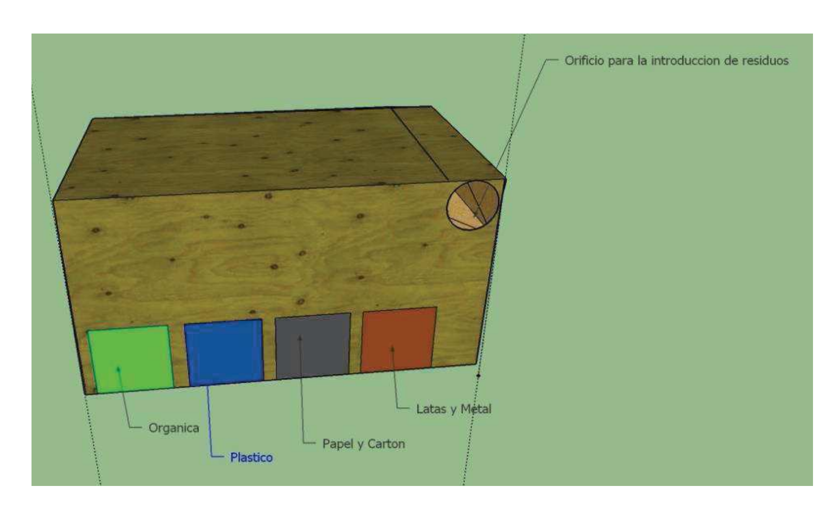


Figura 2.- Diseño 3D del contenedor para la clasificación de residuos.



En la figura 3 se visualiza el diseño en CAD (dibujo asistido por computadora) del mecanismo interno del sistema de clasificación de residuos. En esta figura se puede ver la compuerta principal, así como la rampa inclinada por donde se deslizaran los residuos y las compuertas con sus respectivos contenedores.

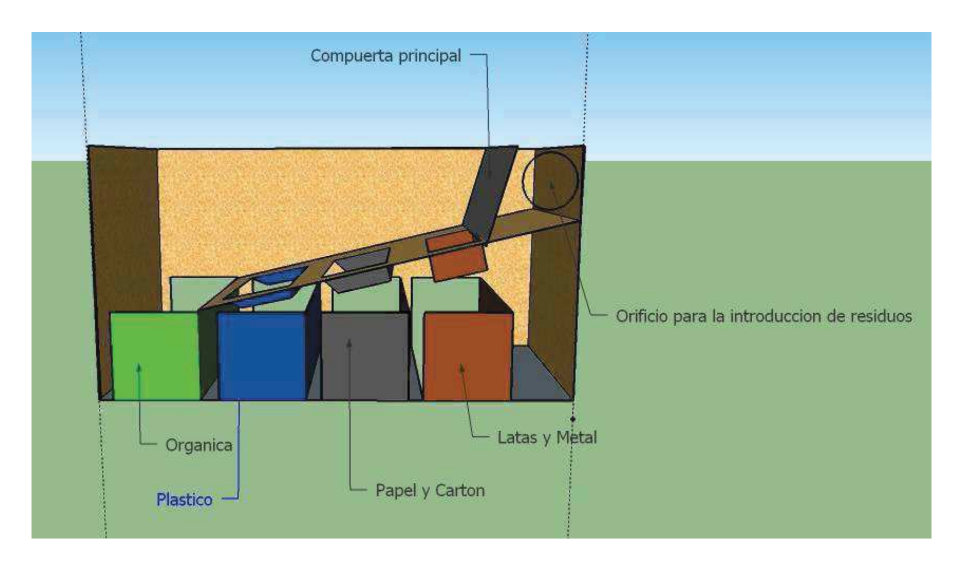


Figura 3.-Diseño 3D del mecanismo interno.

En la figura 4 se visualiza el diseño en CAD (dibujo asistido por computadora) del sistema de clasificación de residuos. En esta figura se puede ver la parte de atrás del sistema con los orificios para retirar los contenedores de una forma fácil cada de que estos lo requieran.

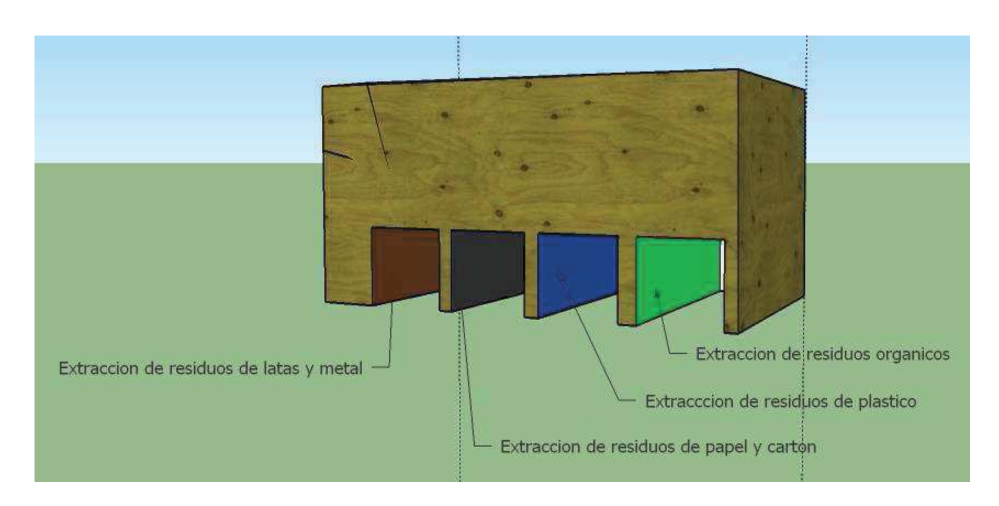


Figura 4.- Diseño 3D, contenedores internos para almacenamiento de residuos.

5. Resultados y Discusión

Al finalizar las simulaciones correspondientes para el sistema de clasificación de residuos se comprobó que la implementación del diseño obtenido resulta viable, ya que mediante la metodología QFD se obtuvieron los requerimientos deseados por las personas que serán los usuarios finales. Debido a esto, se establece la utilidad de este diseño, además que en la actualidad no existe un producto para casas habitación de estas características.

Los materiales con los que se diseñó el sistema, son materiales ecológicos que al terminó de su vida útil podrán ser reciclados, como los contenedores de plástico que se les puede dar otro

ISBN: 978-607-9394-14-1.



uso, al igual que los componentes de control como el microcontrolador y sensores, y otros que no conllevan a un problema ecológico, como lo son el triplay.

Cabe mencionar que para obtener las conclusiones finales se tendrán que realizar prototipos del sistema y entregar algunos a las personas en casas habitacionales para hacer sus respectivas pruebas, y así obtener información de su funcionalidad, aplicabilidad y satisfacción de los usuarios, esta acción será realizada en un trabajo futuro ya que para la implementación de estos se necesita una inversión económica con la que por el momento no se cuenta.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló la metodología QFD, con el objetivo de obtener un diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos obligatorios del cliente y la mayoría de los deseables. Esta metodología conlleva identificar la necesidad del cliente y sus requerimientos. Después, se clasifican los requerimientos en obligatorios y deseables, luego se procede a la traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería a fin de establecer metas de diseño, generar y evaluar conceptos adecuados para resolver la necesidad, esto a través de filtros de factibilidad, disponibilidad tecnológica, las necesidades del cliente y matrices de decisión, culminando con la determinación del concepto ganador, el cual debe dar solución a la necesidad planteada desde un principio, en este caso el diseño de un dispositivo de almacenamiento y conteo de monedas atractivo para fomentar la cultura del ahorro.

Una vez superada la etapa de diseño conceptual, se procede a realizar el diseño a detalle que es la implementación física del sistema propuesto, en esta etapa se pueden corregir algunos aspectos de la etapa anterior, pero estas correcciones son mínimas.

Una vez terminada la etapa de implementación de diseño obtenido para el diseño conceptual del sistema de clasificación de residuos mediante diferentes pruebas y filtros se llegó a la conclusión de que resulta factible su implementación.

Referencias

[1] Cross N. *Métodos de diseño: estrategias para el diseño de productos*. Limusa, México 2009.

[2] Dym C & Little P. El proceso de diseño en ingeniería. Limusa, México 2009.

[3] Reyes F. y Cid J. *Arduino aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías*. Alfaomega. México, 2015.

[4] González M. *QFD, La Función de la calidad, Una guía práctica para escuchar la voz del cliente*. Mc. Graw Hill. México, 2000.

[5] Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina, 2010. [En línea]. México, disponible en: https://publications.iadb.org [Acceso el día 25 de Marzo del 2018].

[6] Careaga, José. *Elementos para una política nacional de manejo de residuos urbanos*. La Salle. Gaceta ecológica. Núm.36. Nueva época, México, 1995

[7] Cortinas de Nava. C, *Manual de capacitación para minimizar residuos a nivel municipal, a través de reducir, reutilizar y reciclar*. Ed. Talleres Gráficos de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, México, 2010.

[8] Hernández D.; Barrera D.; Álvarez; Benítez M.; Hernández G. *Diseño conceptual de un dispositivo electrónico de almacenamiento y conteo de monedas*. CIEES, p.p. 1-9, México, 2016.

[9] Informe del Medio Ambiente, 2017. [En línea]. México, disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe15/tema/cap7.html [Acceso el día 11 de Abril del 2018].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño Conceptual e Implementación de un Sistema Embebido en una Cafetera

Ávila Gutiérrez Oscar Josué, Chávez Pérez Blanca, Rodríguez Nicolás Genaro y Hernández Lara Derlis

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
División de ingeniería informática
Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

*El presente proyecto pretende mejorar la industria de los electrodomésticos, así como el uso de dispositivos electrónicos en el hogar, específicamente hablando de una cafetera conectada a internet de todas las cosas, o por sus siglas en ingles IOT (**Internet of things**). Esto con la finalidad de mejorar la gestión del dispositivo, a través de la conexión vía wi-fi y con ayuda de una aplicación móvil, circuitos electrónicos, microcontroladores, entre otros más, mismos que ayudaran a la gestión eficiente del dispositivo. En la etapa del diseño conceptual óptimo, se implementó la metodología de despliegue de la función de calidad (QFD por sus siglas en inglés, **Quality Function Deployment**), aplicada al diseño en ingeniería en la que se consideran las necesidades del cliente y sus requerimientos, es decir que se diseña a lo que requiere específicamente el cliente.*

Palabras clave: Cafetera, control remoto, IOT, Gestión eficiente, Sistema embebido.

1. Introducción

Un sistema embebido es un dispositivo electrónico que es diseñado para realizar una función determinada mismo que es parte de un sistema más amplio, su característica principal es el uso de un procesador (CPU) o microcontrolador, que con ayuda de un algoritmo cargado en el mismo permita gestionar y controlar las operaciones del sistema al que pertenece [1].

En 2009 Kevin Ashton, profesor del MIT en aquel entonces, usó la expresión ***Internet of Things*** *(IOT)* de forma pública por primera vez, y desde entonces el crecimiento y la expectación alrededor del término ha ido en aumento de forma exponencial. Fue en el *RFID journal* cuando Ashton acuñó públicamente el término. Aunque él mismo ha comentado que la expresión era de uso corriente en círculos internos de investigación desde 1999, si bien no se hizo público de forma notoria hasta entonces. [2]

Actualmente, el mexicano consume cerca de 1.4 kilogramos de café per cápita, y el país crece de 1.5 a 2 millones de consumidores cada año [3]. Por lo que el consumo de café es una de las principales fuentes de ingresos para muchas empresas, mismas que han crecido de manera exponencial en la actualidad, con marcas reconocidas a nivel nacional e internacional que han logrado establecer un amplio nicho de mercado.

Con la llegada de nuevas tecnologías la preparación del café ha cambiado, mientras en sus orígenes se lograba únicamente utilizando dos recipientes metálicos comunicados por una chapa llena de agujeros a modo de colador utilizando la parte inferior llena de agua y café molido, todo esto acompañado de fuego lo cual era lento y peligroso de cierta forma [4], hasta llegar a la

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



actualidad donde se cuenta con cafeteras que elaboran el café solo presionando un par de botones y llenando los compartimientos necesarios, además de ofrecer más variedad en la preparación de distintos tipos de café en un mismo dispositivo, contando con opciones a elegir, entre los cuales se encuentran como ejemplo: café capuchino, café negro, café expresso, entre otros más, haciendo el uso de las cafeteras más sencillo, completo y eficaz al momento de su manipulación.

Sin embargo, ha habido un avance en el ámbito de preparación de café, actualmente en la era del internet de las cosas (IOT), no existe algún avance tecnológico más allá de las mejoras mecánicas presentes en los diversos equipos existentes, por lo que es necesario un cambio en vista de la actualización de todos los aparatos del hogar.

2. Desarrollo y/o Campo teórico

Con respecto a la realización del diseño conceptual del prototipo, se implementó la metodología QFD (por sus siglas en inglés, ***Quality Function Deployment***). Permitiendo llegar a un diseño más funcional y competitivo, ya que éste puede ser mejorado en la etapa de diseño a detalle. A continuación, se muestran las consideraciones más sobresalientes de dicha metodología de diseño.

2.1 Identificación de la necesidad

La creciente demanda del consumo de café como bebida, sugiere la creación de nuevas herramientas para la gestión del proceso de elaboración de este, ya que a pesar de existir opciones en el mercado tradicionales su costo es demasiado elevado, lo cual presenta un problema actualmente el cual afecta desde consumidores en el hogar hasta entornos más industrializados que requieren una gran capacidad de funcionamiento.

2.2 Objetivo

a) Objetivo General.

Obtener el diseño conceptual e implementar un sistema embebido en una cafetera convencional, el cual permita el manejo y monitoreo a distancia de la elaboración del café como bebida mediante una aplicación móvil con la finalidad de hacer más fácil y practico el uso y/o gestión del dispositivo.

b) Objetivos específicos.

- Realizar un diseño enfocado a IOT para la gestión del dispositivo.
- Contar con diferentes opciones de preparación del café para el usuario.
- Realizar modificaciones en una cafetera convencional para que capte instrucciones vía Wi-fi.

2.3 Definición del problema

A lo largo de los años la industria electrodoméstica enfocada a la elaboración del café como bebida no ha mostrado un avance significativo en el ámbito tecnológico, específicamente hablando en cuanto a la administración, preparación y monitoreo de la elaboración del café, además de que las cafeteras ya existentes cuentan con un alto consumo de energía , así como un costo demasiado elevado para los amantes del café, por lo tanto es factible el diseño de una cafetera con tecnología IOT y con un consumo de energía menos elevado. en el artículo

ISBN: 978-607-9394-14-1.



"Cafeteras eléctricas" publicado por la PROFECO muestra una comparativa tabla 1, entre diferentes dispositivos según su capacidad de producción [6].

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



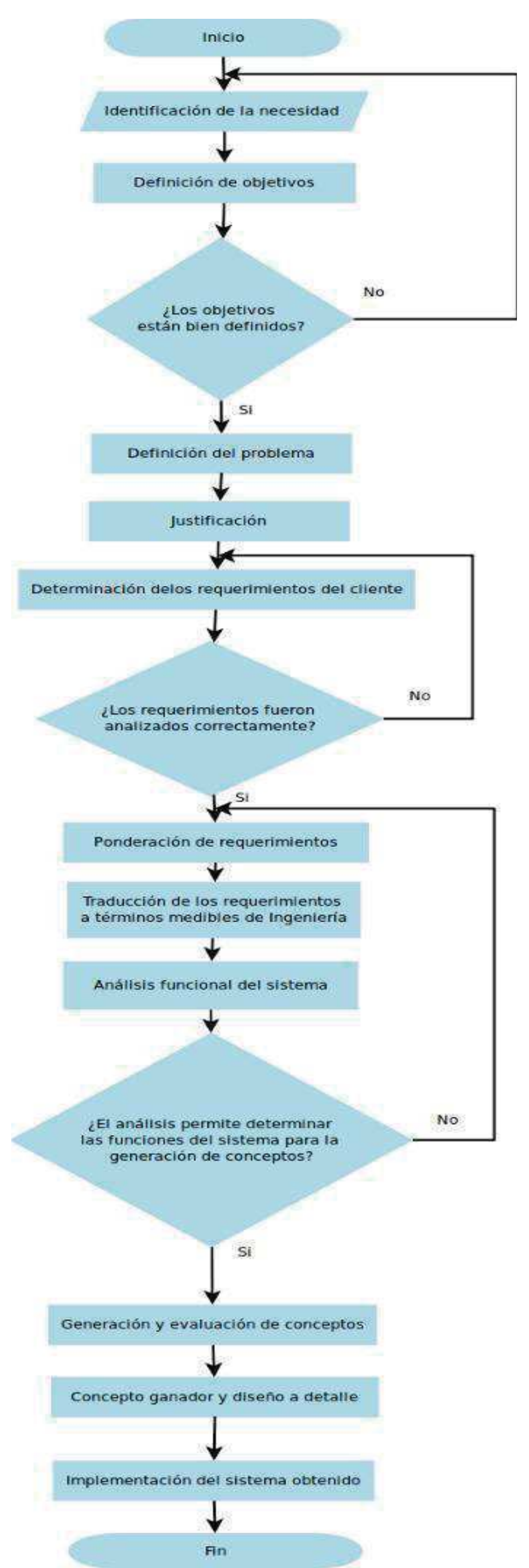


Figura 1. Diagrama de flujo de metodología QFD [5].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Comparación de consumo energético de acuerdo al número de tazas de café producidas en cafeteras presentes en el mercado.

Marca / Modelo País de origen	Garantía (años)	Consumo de energía (W)	Información al consumidor	Facilidad de uso	Facilidad de limpieza de la cafetera	Acabados	Capacidad máxima de la cafetera (no. de tazas)
Philips / HD7606 Essence / Holanda	1	1570	Completa	E	E	E	11.4
Braun / KF 157 Flavor Select / México	1	1200	Incompleta	E	E	E	11.5
Braun / KF 400 Aromaster /	1	900	Incompleta	E	E	E	9.6
Proctor Silex /41461-MX Easy Morning / México	2	1100	Completa	E	E	E	12.3
Braun / KF12 Aromaster 12 / México	1	850	Incompleta	B	E	B	4.3
Moulinex / BW9 / México	1	910	Completa	B	E	E	5.3

2.4 Justificación

El incremento en consumo de café en los últimos 5 años ha permitido la proliferación del negocio de café en el país [7] sin embargo, la tecnología involucrada en el proceso de elaboración de café presenta un atraso frente al crecimiento de otros dispositivos.



Figura 2. Consumo de café en el año 2017.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Dado a esto se muestra un cierto avance tecnológico en cuanto a la industria del café como bebida como pueden ser:

- **Temperatura**. Las máquinas de ahora permiten controlar y ajustar parámetros como la temperatura del agua, incluso de manera individualizada (en cada grupo de la máquina) para preparar el café.
- **Pesos digitales integrados a las máquinas**, lo que significa que podemos estandarizar el peso líquido de cada taza de café resultante de la extracción.
- **Pre-infusión**, parte muy importante del método de preparación que consiste en el precalentamiento de la cama del café molido para poder hacer una extracción más uniforme y evitar que haya canalización o ruptura de la cama del café en el portafiltro cuando ésta es atravesada por el agua caliente. La primera máquina de este tipo de pre-infusión es original de 1961 y se conoce como la Faema E61 y ahora tenemos nuevas como la Black Eagle de la marca Victoria Ardino, usada hoy por hoy en campeonatos mundiales y que permite ajustar todos los parámetros de manera digital.
- **Molinos como el Baratza Sette 270W** (ganador del renglón producto innovador del año 2016 en Dublin) que incluye peso digital en la máquina y permite que el barista programe la dosis o cantidad de gramos de café exacta para cada preparación de café.
- **Utensilios** como el PUQ PRESS que es un tamper o compactador automático que permite programar digitalmente, entre 15 y 40 kg de presión que se ejerce al compactar la cama del café molido dando como resultado una consistencia en el shot de espresso.

2.5 Determinación de los requerimientos del cliente

Los requerimientos son clasificados de acuerdo con su jerarquía, siendo los funcionales los que influyen directamente en la manera en cómo opera el dispositivo, además de contar con otras clasificaciones de acuerdo con las características físicas, de instalación, mantenimiento y económicos del dispositivo.
A través de muestreo probabilístico, específicamente muestreo aleatorio simple nos dice que es la técnica de muestreo en la que todos los elementos que forman el universo y que, por lo tanto, están descritos en el marco muestral, tienen idéntica probabilidad de ser seleccionados para la muestra.
Se hará uso del muestreo sin reposición ya que según César Pérez López, en su libro "Muestreo Estadístico" en 2005:

"El muestreo aleatorio simple sin reposición siempre es más eficiente.
(López, 2005)*"*

Para poder observar este resultado, partimos de la siguiente expresión para el tamaño de muestra en un M.A.S. sin reposición:

$$n = \frac{Z^2 pq}{E^2} \quad (1)$$

Se quiere estudiar la aceptación de una nueva cafetera conectada a IOT, por ello se debe calcular el tamaño de la muestra de una población, sobre lo cual no se ha hecho ningún estudio anterior; se acepta un margen de error máximo a aceptar del 10%. Se debe determinar el tamaño de la muestra con un nivel de confianza del 90%.

Donde:

p=0.5 (proporción de elementos que posee la característica de interés, como no se menciona por default es 0.5).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



q=1-p=0.5.
z=1.645 (nivel de confianza de 90%, tablas definidas).
e=0.1 (error, tabla definida).
n= número total de la población a estudiar.

$$n = \frac{1.645^2 x 0.5 x 0.5}{0.1^2} \quad (2)$$

n= 67 personas

A continuación, se presenta el cuestionario que se aplicó esto con la finalidad de obtener las opiniones acerca de la implementación de IOT en una cafetera, cabe destacar que el rango de edad de los encuestados es de 20 a 65 años de edad.

1.- ¿Con cuantas piezas de ensamblado le gustaría que cuente una cafetera?
a) Máximo 2
b) De 2 a 4
c) Más de 4

2.- ¿Qué opina acerca del control remoto a distancia en la cafetera?
a) Buena idea
b) Indiferente
c) Mala idea

3.- ¿Considera que para el manejo de la cafetera a distancia el uso de una aplicación móvil es la mejor elección?
a) No
b) Si
c) Tal vez

4.- ¿Considera importante que el dispositivo deba ahorrar energía?
a) Si.
b) No.
c) Me es indiferente.

5.- ¿Qué opina acerca del control remoto a distancia en la cafetera?
a) Buena idea
b) Mala idea
c) Indiferente

6.- ¿El manejo y/o uso sencillo del dispositivo es importante para usted?
a) Si
b) No
c) Me es indiferente

7.- ¿Considera que la limpieza sencilla y el mantenimiento menor sea un factor importante?
a) Si
b) No
c) Me es indiferente

8.- En cuánto al costo, ¿cuánto está dispuesto usted a pagar por una cafetera con las características mencionadas en preguntas anteriores?
a) $800
b) $1500
c) $2000

9.- ¿El peso general de una cafetera oscila entre los 3 a 5kg usted considera que es un peso excesivo?

ISBN: 978-607-9394-14-1.

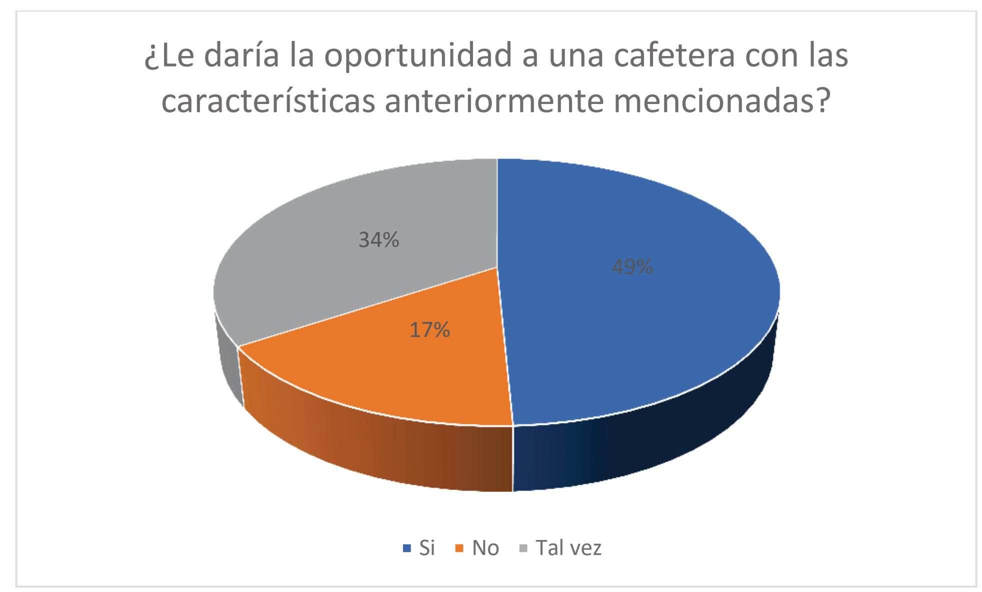


a) Si
b) No
c) Lo desconozco

10.- ¿Si existiera una cafetera con las características mencionadas en la pregunta 5 y 6 le daría una oportunidad de uso?

a) Si
b) No
c) Tal vez

De lo anterior se determinó lo siguiente:
Un 49% de la población encuestada, indica que adquirirían la cafetera.



Gráfica 1. Porcentaje de personas que comprarían una cafetera con tecnologías anteriormente mencionadas.

A partir del estudio anterior se obtienen los siguientes requerimientos de diseño para el sistema:

a) Requerimientos funcionales.
A1) Asegurar que la bebida este a la temperatura correcta.
A2) De fácil gestión.
A3) Control remoto a distancia.
A4) Saber el estado de la preparación de la bebida.
A5) El dispositivo deberá ahorrar energía.
A6) Preparar café.

b) Requerimientos físicos.
B1) Dimensiones de una cafetera Estándar 25 x 35 x 25 cm.
B2) Peso 5 kg ensamblada.
B3) Capacidad de contenedor 1 L.

.

c) Requerimientos de instalación.
C1) Contar con solo 2 piezas: el aparato electrónico y los contenedores donde será depositado el café y agua.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



d) Requerimientos de mantenimiento.
D1) Mantenimiento menor.
D2) Limpieza sencilla.

e) Requerimientos económicos.
E1) Costo de producción no mayor a $800 pesos.

f) Requerimiento de adaptación.
F1) Movilidad Sencilla.
F2) Diseño ergonómico.

Una vez determinados los requerimientos se procede a realizar la tabla 2 que agrupe los mismos de acuerdo su grado de importancia siendo Obligatorios los necesarios para el funcionamiento del dispositivo y Deseables los que proporcionan una funcionalidad adicional, esto con el fin de determinar qué objetivos deseables pueden ser establecidos para su implementación en el proyecto.

Una vez definidos los requerimientos deseables es necesario ponderarlos para saber su nivel de importancia para de esta manera ser incluidos en el proyecto, intentando incluir la mayor cantidad de ellos o si es posible todos en la medida en que su inclusión no suponga un obstáculo para el cumplimiento de los objetivos obligatorios, esto se muestra en la Tabla 3.

Para obtener el cálculo del nivel de importancia se hace uso de dos valores de comparación, siendo estos los siguientes:

- (+). Significa que el requerimiento a evaluar (horizontal) es más importante que su contraparte (vertical)

- (-). Significa que el requerimiento a evaluar (horizontal) es menos importante que su contraparte (vertical)

Tabla 2. Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables.

Requerimientos	
Obligatorios	Deseables
A1) Asegurar que la bebida este a la temperatura correcta	A2) De fácil gestión
A3) Control remoto a distancia	B1) Dimensiones de una cafetera Estándar 25 x 35 x 25 cm
A4) Saber el estado de la preparación de la bebida	B2) Peso 5 kg ensamblada
A5) El dispositivo deberá ahorrar energía	C1) Contar con solo 3 piezas: el aparato electrónico y los contenedores donde será depositado el café y agua
A6) Preparar café	D1) Mantenimiento menor
B3) Capacidad de contenedor 1 l	E1) Costo de producción no mayor a $800 pesos
D2) Limpieza sencilla	F1) Movilidad Sencilla
	F2) Diseño ergonómico

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una vez evaluado es necesario calcular la suma de los valores positivos (+) para establecer su total Σ (+), posteriormente se calcula el total de la suma de esta columna, para posteriormente calcular su porcentaje tal como se expresa en la ecuación 3:

$$Ir(\%) = \frac{\Sigma(+)}{Total} * 100 \quad (3)$$

Tabla 3. Ponderación de los requerimientos deseables.

	A2	B1	B2	C1	D1	E1	F1	F2	Σ(+)	Ir%
A2		+	+	+	-	-	+	-	4	14.28
B1	-		+	+	-	-	-	-	2	7.14
B2	-	-		-	-	-	+	-	1	3.57
C1	-	-	+		-	-	-	-	1	3.57
D1	+	+	+	+		+	+	+	7	25
E1	+	+	+	+	-		+	+	6	21.42
F1	-	+	-	+	-	-		-	2	7.14
F2	+	+	+	+	-	-	+		5	17.85
								TOTAL	28	100

Una vez ponderados los requerimientos deseables del usuario es necesario realizar la tabla 4, misma que permita ordenar de acuerdo con el nivel de importancia que fueron obtenidos en la tabla 3.

Tabla 4. Orden de importancia de los requerimientos deseables.

Orden de importancia	REQUERIMIENTOS DESEABLES	∑(+)	Ir (%)
1	D1) Fácil mantenimiento	7	25
2	E1) Costo de producción no mayor a $800 pesos	6	21.42
3	F2) Diseño ergonómico	5	17.85
4	A2) De fácil gestión	4	14.28
5	F1) Movilidad Sencilla	2	7.14
6	B1) Dimensiones de una cafetera Estándar 25 x 35 x 25 cm	2	7.14
7	C1) Contar con solo 2 piezas: el aparato electrónico y el Contenedor donde será depositado el café	1	3.57
8	B2) Peso 5 kg ensamblada	1	3.57
	Total	28	100

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.6 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Una vez determinados los requerimientos es necesario traducir su información a términos cuantificables, es decir los requerimientos establecidos por el cliente tienen que ser definidos en términos medibles de ingeniería de manera que puedan ser asociados directamente con una unidad de medida, en caso de que esta transformación no sea posible se determinará un significado explícito según la actividad a realizar, en la tabla 5 se puede observar la comparativa entre los requerimientos del cliente y los términos medibles de ingeniería asociados a los mismos.

Metas de diseño

- Calentar el agua a la temperatura adecuada de acuerdo con la opción seleccionada por el usuario.
- Reducir el tiempo de operación.
- Manejo sencillo y seguro.
- Contar con un módulo WiFi o Bluetooth para recepción y envió de datos.
- Aplicación móvil compatible con *Android,* que permita la gestión de usuarios.
- Dimensiones de 25x35x25cm.
- Peso menor o igual a 5 kg.
- Fácil montaje.
- Mantenimiento menor.
- Costo de producción menor a $800.00.
- Diseño ergonómico.
- Reducir el consumo energético a menos de 700 Watt.

Tabla 5. Traducción a términos mensurables de ingeniería.

Requerimientos del cliente	Requerimientos técnicos
A1) Asegurar que la bebida este a la temperatura correcta	Emplear la temperatura de la bebida de acuerdo a la opción seleccionada por el usuario
A2) De fácil gestión	De fácil gestión
A3) Control remoto a distancia	Módulo Wi-fi o Bluetooth conectado a una aplicación realizada en *Android studio*
A4) Saber el estado de la preparación de la bebida	Envió de notificaciones a una aplicación móvil en *Android*
A5) El dispositivo deberá ahorrar energía	Consumo energético bajo, no mayor a 700 W
A6) Preparar café	Realizar la Mezcla de los ingredientes de la bebida de acuerdo con la opción seleccionada en la aplicación
B1) Dimensiones de una cafetera Estándar 25 x 35 x 25 cm	Dimensiones de una cafetera estándar 25x35x25
B2) Peso 5 kg ensamblada	Peso igual o menor a 5 kg
B3) Capacidad de contenedor 1 L	Capacidad de producción de 1 litro
C1) Contar con solo 2 piezas: el aparato electrónico y los contenedores donde será depositado el café y agua	Montaje completo con 2 piezas el aparato electrónico y el contenedor de grano y agua
D1) Mantenimiento menor	Mantenimiento sencillo y a largo plazo
D2) Limpieza sencilla	Limpieza simple, fácil y rápida
E1) Costo de producción no mayor a $800 pesos	Costo de producción no mayor de $800
F1) Movilidad Sencilla	Posibilidad de transporte sencillo

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



F2) Diseño ergonómico	Diseño ergonómico

2.7 Análisis funcional del sistema

En el análisis funcional se establecen las funciones que el sistema debe de cumplir, delimitando la función principal y las subfunciones que tienen que ser realizadas para poder llevar a cabo la misma o cumplir con los requerimientos. La función principal del sistema cuenta con el papel a desempeñar por parte del mismo, que a su vez es apoyado por diversas acciones complementarias más específicas que serán realizadas por el sistema para dar solución a las necesidades obtenidas, con la finalidad de cumplir con el correcto funcionamiento del dispositivo y a su vez asegurando que se cumplen con lo establecido por el cliente.

En la figura 3 se puede apreciar el árbol de funciones del sistema que será diseñado, en el que se puede notar la presencia de la función principal y de las subfunciones mismas que deben realizarse para asegurar el cumplimiento de la función global y los requerimientos establecidos por el cliente.

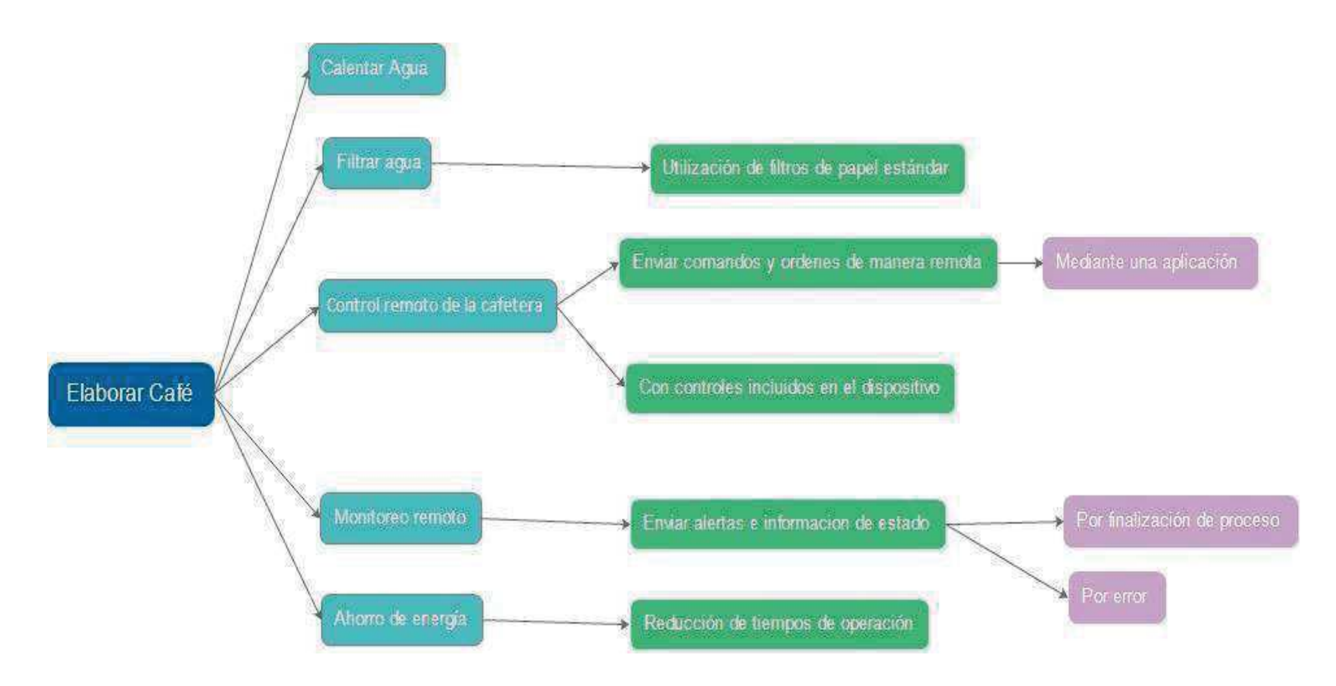


Figura 3. Árbol de funciones

2.8 Generación y evaluación de conceptos

Una vez que se estableció el análisis funciona es necesario la propuesta de soluciones para resolver las funciones planteadas, esto se realiza mediante una lluvia de ideas para así dar lugar a la creación de conceptos que podrán dar forma al sistema a diseñar, mismos que son mostrados en la tabla 6, una vez que son generadas las posibles opciones que se tienen como solución en cada función es necesario realizar una etapa de evaluación para obtener el diseño que contemple de una manera mejor y más eficiente las funciones y que además cumplan con las expectativas establecidas por el cliente.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 6. Generación de concepto.

	Concepto			
Funciones	**A**	**B**	**C**	**D**
1-Calentar Agua	Resistencia eléctrica	Quemador de gas	Resistencia a base de celda solar	Microondas
2-Filtro de agua	Papel	Papel	Malla de aluminio-acero	Malla de aluminio-acero
3-Control remoto de la cafetera	Wi-fi	Bluetooth	Infrarrojo	Frecuencias de radio
4-Monitoreo Remoto	Wi-fi	Bluetooth	Infrarrojo	Frecuencias de radio

En el primer filtro Tabla 7 se muestra que más de la mitad de los conceptos son factibles para poder trabajar con ellos.

Tabla 7. Primer filtro. Evaluación por factibilidad.

Funciones	A	B	C	D
1-Calentar Agua	X	X	-	X
2-Filtro de agua	X	X	X	X
3-Control remoto de la cafetera	X	X	-	X
4-Monitoreo Remoto	X	X	-	X
¿Factible?	SI	SI	NO	SI

El segundo filtro es de disponibilidad tecnológica, en el cual se verifica que todas las soluciones a las funciones sean capaces de poderse diseñar o seleccionarse con base en los conocimientos teóricos o la maquinaria actual, de donde se puede apreciar en la tabla 8 que todos los conceptos cumplen de manera adecuada con este filtro.

Tabla 8. Segundo filtro. Evaluación por disponibilidad tecnológica.

Funciones	A	B	C	D
1-Calentar Agua	X	X	X	X
2-Filtro de agua	X	X	X	X
3-Control remoto de la cafetera	X	X	-	X
4-Monitoreo Remoto	X	X	-	X
¿Disponible?	SI	SI	NO	SI



El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso se descarta el concepto B y solo queda el concepto A como viable (ver tabla 9).

Tabla 9- Tercer filtro. Evaluación basada en los requerimientos del cliente

Funciones	A	B	C	D
1-Calentar Agua	X	-	-	-
2-Filtro de agua	X	X	X	X
3-Control remoto de la cafetera	X	-	-	-
4-Monitoreo Remoto	X	-	-	-
¿Viable?	SI	NO	NO	NO

Después de esto se mezclaron dos conceptos, para no descartarlos y se genera conceptos aceptables con este filtro y se forman los conceptos AB y AD como muestra tabla 10.

Tabla 10. Evaluación basada en matrices de decisión.

Requerimientos deseables	Conceptos			
	Calificación relativa	A	AB	AD
D1) Fácil mantenimiento	25	*	+	-
E1) Costo de producción no mayor a $800 pesos	21.42	*	-	-
F2) Diseño ergonómico	17.85	*	-	+
A2) De fácil gestión	14.28	*	+	+
F1) Movilidad Sencilla	7.14	*	-	+
B1) Dimensiones de una cafetera Estándar 25 x 35 x 25 cm	7.14	*	-	+
C1) Contar con solo 2 piezas: el aparato electrónico y el Contenedor donde será depositado el café	3.57	*	-	-
B2) Peso 5 kg ensamblada	3.57	*	-	-
∑+		8	2	4
Peso total	100	100	39.28	46.41
Mejor concepto (Ranking)		1	3	2

En primer lugar, se determina mediante un filtro la factibilidad donde las posibles soluciones son evaluadas con base a que sean elementos que cumplan con las funciones y que a su vez no tenga ningún conflicto con los requerimientos funcionales brindados por el cliente

2.9 Concepto ganador y diseño a detalle

Recordando que la fase de *diseño a detalle* corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución, basándose en la tecnología disponible se llegó al diseño siguiente:

Después de realizar los filtros correspondientes se obtiene como ganador el concepto A; para el procesamiento de la información recibida y enviada se utilizará un microcontrolador, ya que esto caracteriza a todo sistema embebido, y esto no afecta drásticamente al diseño conceptual obtenido. El diseño del dispositivo estará conformado por un contenedor en forma rectangular en la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



parte trasera de la cafetera, que tendrá en el exterior únicamente el módulo Wi-fi (ESP8266), esto con la finalidad de que el dispositivo tenga un mejor alcance en cuanto a la señal inalámbrica.

El mecanismo de control de paneles de agua y de café estará al interior del contenedor. El microcontrolador también se encontrará en el interior, el cual será alimentado por corriente eléctrica a la que esté conectada la cafetera. El microcontrolador se encargará del manejo (abrir o cerrar) los contenedores de café o agua y con ello preparar la bebida deseada por el usuario el cual deberá agregar el azúcar manualmente una vez finalice el proceso de elaboración de la bebida, además de brindar información de la misma, la cual será enviada al cliente por medio del módulo ESP2866.

Para la parte de petición/respuesta de información por parte del cliente, esta podrá ser visualizada en una aplicación diseñada en *Android Studio* para dispositivos móviles contando con datos de la cafetera como su nombre, en que red estableció conexión, además de información como estado actual de su café, diferentes opciones de elaborado de su café ya predeterminados, entre otras más.

2.10 Implementación del diseño obtenido

A continuación, se muestran los esquemas, diagramas así como el programa realizado en la etapa de diseño a detalle, en la figura 4 se observa la conexión electrónica de la etapa de control del sistema embebido en el momento donde se da la orden y este sirve la bebida según la opción del usuario; en esta figura se percibe entradas simulando la conexión vía Wi-fi a través de un microcontrolador y un módulo serial los cuales reciben las opciones ingresadas en el monitor serial y con ello establecen la comunicación entre cafetera e internet, además esta simulación podrá ponerse en funcionamiento a través de instrucciones dadas con ayuda de un teclado convencional, abrirá o mantendrá cerrado los paneles de la cafetera según la opción seleccionada por el usuario (la simulación será corroborada con el giro de los motores y el estado de los led).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



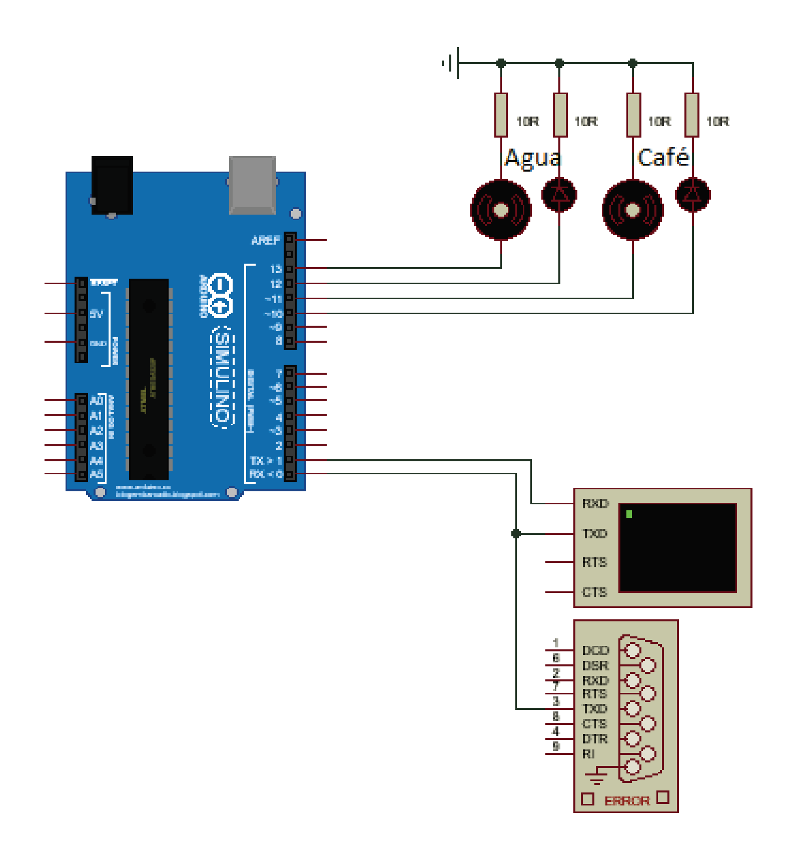


Figura 4. Simulación de componentes para el control inalámbrico de la cafetera vía Wi-Fi.

En la figura 5 se observa que la conexión con el módulo ESP8266 se ha realizado de manera exitosa esto se corrobora cuando en el monitor serial se muestra el mensaje 'READY'. Ahora la cafetera esta lista para recibir datos y realizar funciones específicas según la selección del usuario, esto a través de internet.

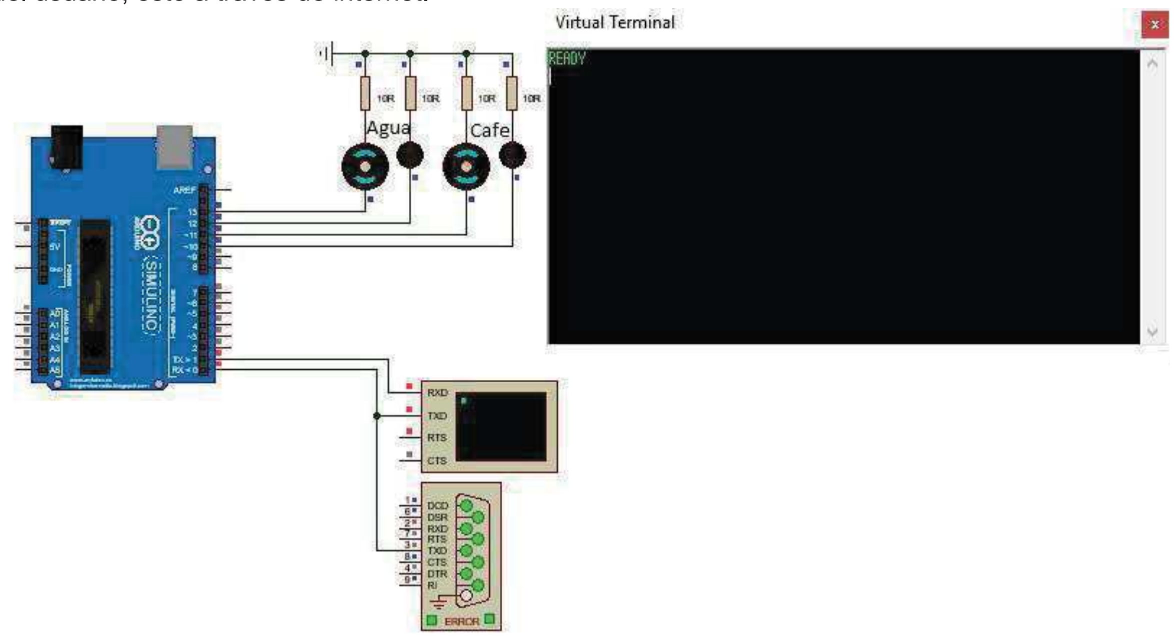


Figura 5. Simulación de conexión vía Wi-Fi para el control inalámbrico de la cafetera.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La cafetera contará con paneles los cuales abrirán determinado tiempo dependiendo de la opción seleccionada por el usuario, ejemplo de ello es la elaboración de café cargado, como se muestra en la figura 6 y 7, el panel de café estará en funcionamiento más tiempo que el panel de agua debido a la composición de la bebida.

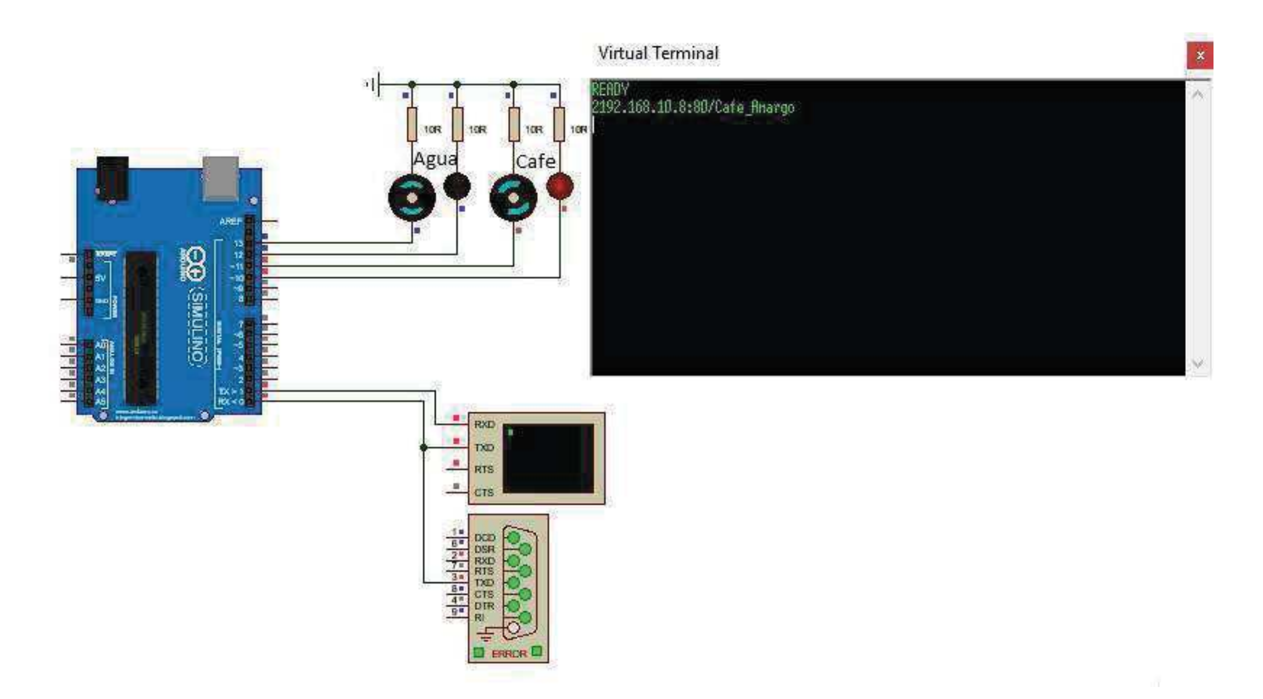


Figura 6. Simulación de funcionamiento vía Wi-Fi para el control inalámbrico de la cafetera.

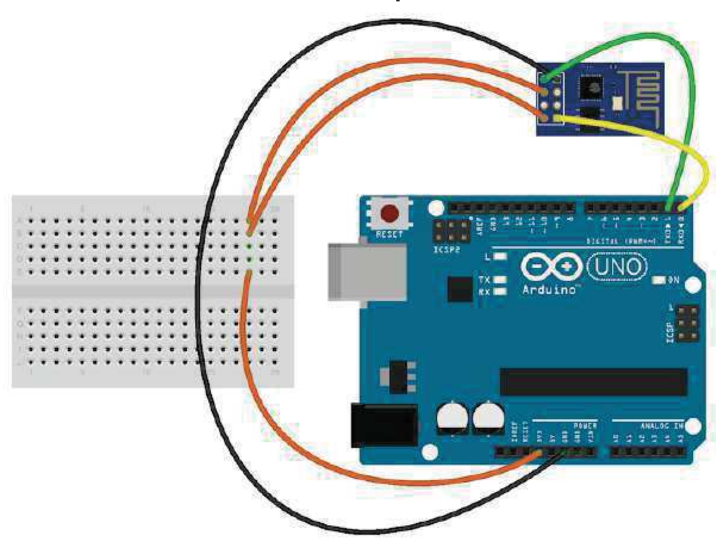


Figura 7. Conexión de Arduino y módulo ESP8266

En la figura 8 se visualiza el diseño en CAD (dibujo asistido por computadora) del dispositivo contenedor.



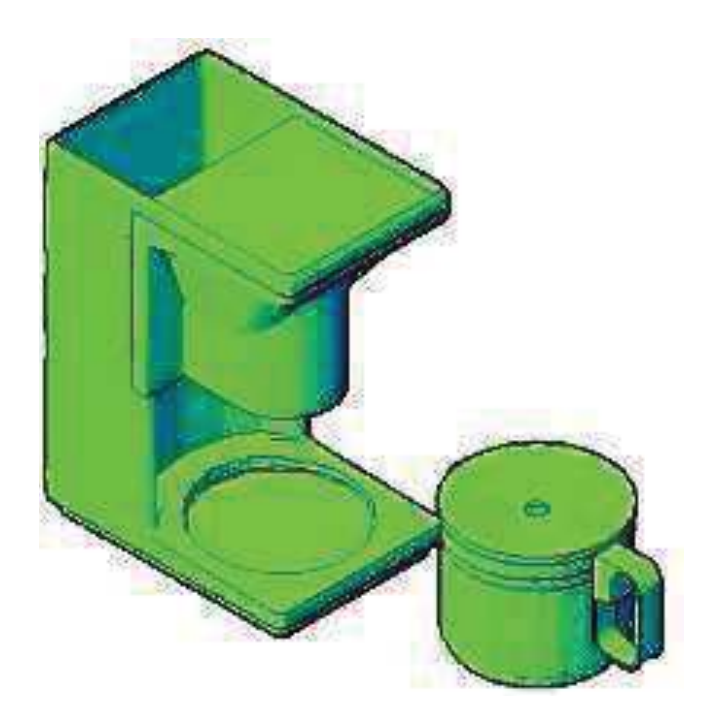


Figura 8. Diseño 3D de cafetera [9].

El desarrollo de la aplicación se realizó considerando las funciones del equipo para de esta forma diseñar la interfaz de usuario de la misma, se optó por un diseño amigable basado en la metodología "***Material design***" como se puede ver en la figura 9 misma que asigna diversos componentes en pantalla priorizando la funcionalidad pero contando a su vez con un diseño claro y amigable para el usuario, en esta pantalla se cuenta con la visualización del modelo del equipo además de una imagen ilustrativa y una descripción corta del estado.



Figura 9. Interfaz principal de la aplicación, la imagen y el modelo son solo ilustrativos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se desarrolló un menú amigable para el usuario que se desliza del lado izquierdo de la pantalla que contiene accesos a los diversos apartados de la aplicación como se puede ver en la figura 10.

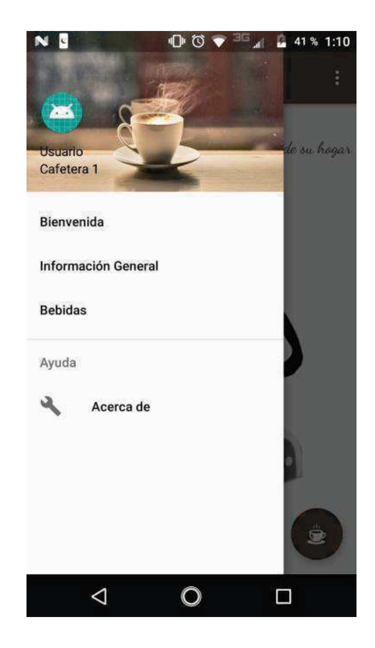


Figura 10. Menú principal de la aplicación.



Figura 11. Información.

La pantalla de información muestra una serie de datos sobre la cafetera y su estado actual de la cafetera, entre los datos disponibles tenemos el modelo, el estado de la conexión, la red a la que está conectada y el proceso que sé este realizando, en caso de estar ejecutando una tarea se muestra un segundo apartado que contiene información de la bebida que está siendo preparada, destacando el nombre, la temperatura, el tiempo restante y el usuario que inicio la acción, como se puede apreciar en la figura 11.

En el apartado bebidas se cuenta con un menú con diversos tipos de café mismos que cuentan con diversos características según la elaboración de la bebida, como puede verse en la figura 12, una vez el usuario seleccione una opción se mostrará una pantalla en la que se da información sobre las características y en la bebida seleccionada para de esta manera el usuario pueda conocer más a detalle las proporciones de la bebida, y una breve descripción para apoyar la decisión del usuario, si el usuario decide consumir la bebida solo deberá presionar el botón preparar bebida para iniciar el proceso, cómo se puede ver la figura 13.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 31, pp. 390-413.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 12.- Menú de selección de Bebidas.

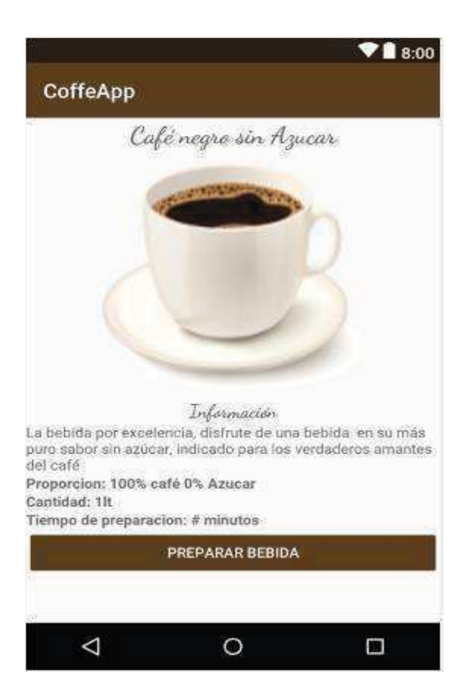


Figura 13. Pantalla de información de bebida.

Nota: Cabe aclarar que las pruebas necesarias fueron realizadas únicamente por simulación es por ello que no se consideró necesario el armado del circuito electrónico físico.

A continuación, se muestran diagramas de flujo del funcionamiento de la aplicación móvil, del sistema embebido aplicado en la cafetera, así como la interacción y forma de trabajo que tienen estos dos entre sí, esto con la finalidad de hacer más comprensible el funcionamiento de las mismas ya que es la representación gráfica del flujo o secuencia de rutinas simples. Tiene la ventaja de indicar la secuencia del proceso en cuestión, así como las unidades involucradas, véase las figuras 14, 15 y 16 respectivamente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 14. Diagrama de flujo de funcionamiento del Sistema embebido

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Inicio

Verificar el estado de la cafetera

¿La cafetera esta ocupada?

Si

No

Desplegar menu principal

Obtener la opción del usuario

¿La opcion "Informacion general" fue seleccionada?

Si

Mostrar la pantalla de Información General

Desplegar información detallada del dispositivo así como de la bebida en curso (si es el caso)

Fin

No

¿La opcion "Bebidas" fue seleccionada?

Si

Mostrar la pantalla de Bebidas

Desplegar el menú de bebidas

Obtener la opción del usuario

Enviar la señal de preparación de café

No

Figura 15. Diagrama de flujo de funcionamiento de la aplicación móvil.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



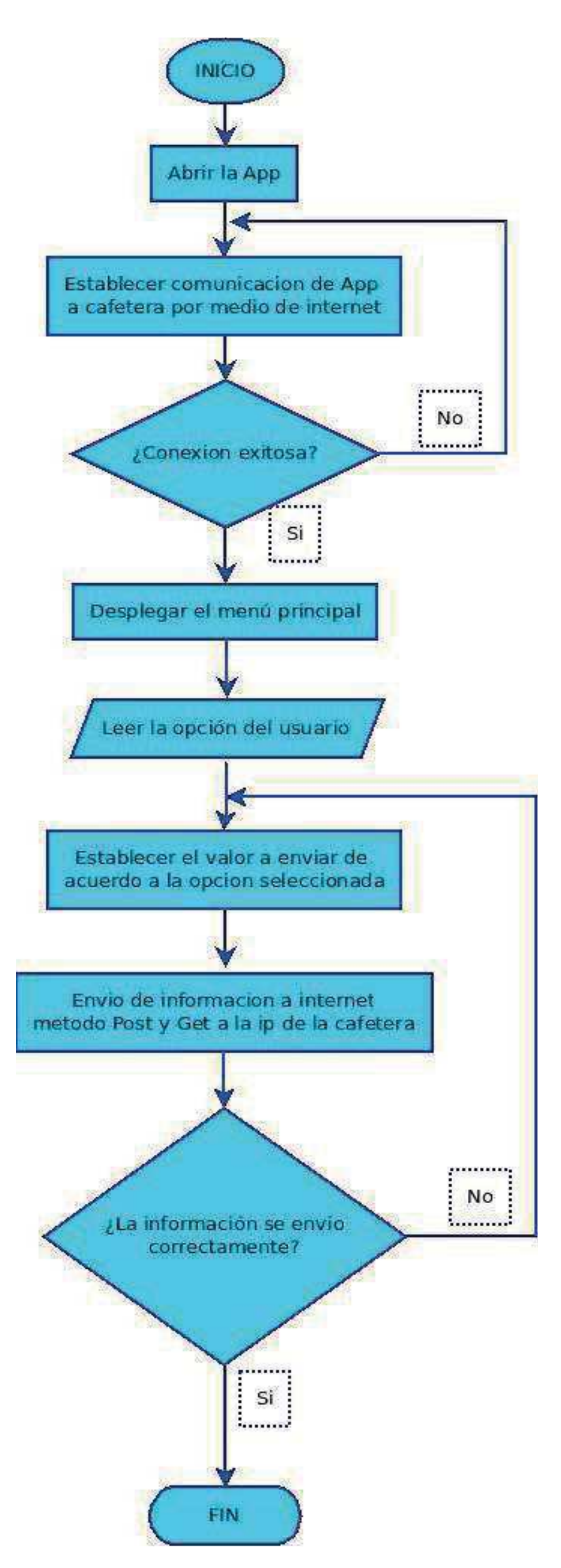


Figura 16. Diagrama de flujo de funcionamiento Aplicación móvil con el Sistema embebido.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Conclusiones

Se desarrolló la metodología *QFD*, para obtener un diseño conceptual que cumpla con todos los requerimientos del cliente. Esta metodología conlleva la identificación de las necesidades de los usuarios finales para posteriormente ser evaluados de acuerdo a diferentes criterios para establecer así las prioridades en el desarrollo y descartar ideas o propuestas que no son factibles para la determinación del concepto ganador, el cual debe dar solución a la necesidad planteada desde un principio

Se logró determinar la factibilidad de la implementación de la filosofía IOT (por sus siglas en ingles ***Internet of things***) en una cafetera convencional, permitiendo al usuario tener control y acceso en cualquier parte de su hogar al aparato, la simulación del prototipo permitió verificar la conexión inalámbrica entre el dispositivo y la aplicación móvil mediante comandos que permiten iniciar el funcionamiento del dispositivo usando una red wi-fi doméstica, con la finalidad de facilitar el manejo de la cafetera.

A partir de este proyecto se puede demostrar el alcance que puede lograr la implementación de sistemas embebidos en aparatos electrodomésticos convencionales, pudiendo abarcar incluso otras áreas que quizá han pasado desapercibidas puesto que sus ventajas no son aprovechadas y explotadas al máximo lo cual impediría obtener beneficios tales como ahorro de energía y tiempo e incluso ahorro económico.

Referencias

[1] Benítez M, Hernández D, Barrera A, Álvarez J, Hernández G, *"Diseño conceptual de un dispositivo electrónico de almacenamiento y conteo de monedas"*, 8vo Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, pág. 2-3, CDMX, 17 al 21 de octubre 2016.

[2] *El origen del IoT. (Pensamientos y tecnología)*. [En línea]. México, disponible en [Acceso el día 08 de abril del 2018]: http://www.bcendon.com/el-origen-del-iot/

[3] *Aumenta la demanda de café en México, pero disminuye la producción* (Expansión). [En Línea] México, disponible en [Acceso el día 08 de abril de 2018]: https://expansion.mx/empresas/2017/05/23/aumenta-la-demanda-de-cafe-en-mexico-pero-disminuye-la-produccion

[4] Carlos Azcoytia, *"La historia de la cafetera"*. [En línea]. México, disponible en [Acceso el día 08 de abril de 2018]: https://www.historiacocina.com/historia/cafe/index.htm

[5] Guadalupe Moreno, *"¿Quieres un café?"*, [En línea], disponible en [Acceso el día 08 de abril de 2018]: https://es.statista.com/grafico/8606/quieres-un-cafe/

[6] Laboratorio de pruebas Profeco, *"Cafeteras eléctricas"*, Revista del Consumidor, No. 304, pág. 4, junio del 2002

[7] Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial, *"Panorama agroalimentario"*. [En línea] México, disponible en [Acceso el día 08 de abril de 2018]: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200636/Panorama_Agroalimentario_Caf__2016.pdf

[8] Rogerbit, *"The power of the bit"*. [En línea]. disponible en [Acceso el día 08 de Abril de 2018]: http://rogerbit.com/wprb/2015/08/encendiendo-4-led-con-modulo-esp8266-y-arduino-uno/

[9] *Planos de casas planos de construcción, "Planos de cafeteras 3D"*. [En línea]. Disponible en [Acceso el día 08 de abril de 2018]: http://www.planospara.com/38208/cafetera-3d-en-electrodomesticos-muebles-equipamiento

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 32, pp. 414-420.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño de un Sistema Mecánico para Rehabilitación de Miembros Inferiores

Martínez-López Luis Manuel, Gómez-Pavón Luz del Carmen y Arriaga-Arriaga Cesar Augusto

Maestría en Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, edif. FCE6-Ciudad Universitaria, Col. San Manuel, Puebla, Puebla.

Resumen

Un exoesqueleto es una estructura externa y a veces articulada que sostiene y/o protege los tejidos blandos del cuerpo. En el presente artículo se muestra un sistema mecánico con aplicaciones médicas enfocado a la rehabilitación de los miembros inferiores del ser humano. Se proporcionan los valores correspondientes a la distribución del peso corporal, así como las características antropométricas de la población mexicana. Se muestra el análisis de la estructura mecánica por medio del Método de Elemento Finto con el fin de comparar los resultados de tensión ejercida por carga aplicada en cada uno de los elementos contra el límite elástico que muestran las especificaciones mecánicas de cada material, por último se ilustra la estructura mecánica construida, la cual cuenta con piezas en plástico PLA impresas en 3D que ejercen la función de las piezas de aluminio 7075 y esta será colocada sobre una persona sana para así poder observar el movimiento en cada articulación, la forma de adaptar las dimensiones de la estructura según el cuerpo del paciente y las dimensiones que ocupa al estar desmontado.

.

Palabras clave: Modelo mecánico, Elemento Finito, materiales, tensión, cargas.

1. Introducción

El problema de la afectación motriz de las extremidades inferiores en México se presenta con más frecuencia que las demás discapacidades, por lo que la búsqueda de nuevas formas de brindar y optimizar las terapias para la rehabilitación de las extremidades crea un impacto positivo en el ámbito médico. La marcha es la capacidad de trasladarse de un punto a otro manteniendo el equilibrio en todo momento debido a la sincronía de sus movimientos [1]. Desafortunadamente, lograr el equilibrio al momento de caminar se complica debido a malformaciones físicas, enfermedades neurodegenerativas, amputaciones o simplemente por el envejecimiento. La pérdida de la psicomotricidad puede causar problemas como complicaciones del sistema digestivo, insomnio, pérdida de masa muscular, complicaciones respiratorias, etc. [2].

La evolución tecnológica en el ámbito de la rehabilitación ha permitido el desarrollo de sistemas automatizados para realizar terapias a personas con afectaciones motoras de tal forma que emulan los movimientos naturales de la extremidad a través del apoyo de sensores y actuadores [3, 4]. Infortunadamente, los sistemas de órtesis automatizadas que ayudan a la recuperación motriz son escasos y la mayor parte de las instituciones que cuentan con ellos son privadas [5]. Con el presente trabajo se pretende incentivar la investigación y desarrollar prototipos

ISBN: 978-607-9394-14-1.



funcionales que puedan ser probados en centros de rehabilitación para beneficio de la población local.

Los estudios antropométricos de la región para la cual se desarrollan los sistemas antes mencionados son necesarios para adaptarlos a quienes se pretenda beneficiar con su desarrollo. La información requerida para ubicar la posición de las articulaciones es la altura y los grados de libertad, mientras que para identificar las cargas que actuarán sobre el miembro se necesita del peso corporal. En los mexicanos en la mujer la estatura promedio es de 1.58 m y el peso varía entre 62.2 kg y 72.2 kg en edades entre los 15 y los 50 años, mientras que en el hombre la altura promedio es de 1.64 m y su peso va de los 70.4 kg a los 77.3kg en el mismo rengo de edad que la mujer [6].

En la tabla 1.1 se muestran los rangos de movilidad sobre el plano sagital presentes en las articulaciones de los miembros inferiores de una persona normal. Complementando esto último, la distribución del peso corporal de las partes que conforman los miembros inferiores es una variable indispensable para conocer las cargas aplicadas sobre las articulaciones, entre ellas se tiene 10.1% del peso ubicado en el muslo, 4.4% en la pierna y 1.5% en el tobillo, dejando un porcentaje peso corporal de 16% sobre cada uno de los miembros inferiores [7, 8].

Tabla 1.1. Grados de libertad en las articulaciones del miembro inferior

Articulación	Movimiento	Grados de libertad
Cadera	Flexión	20°
	Extensión	90°
Rodilla	Flexión	90°
Tobillo	Flexión	20°
	Extensión	20°

2. Metodología

Un sistema automatizado para el auxilio de la movilidad involucra diversos factores que estarán interactuando en todo momento. La estructura mecánica será el elemento principal debido a que interactúa directamente con el paciente. Además, sobre la estructura será donde se coloquen los elementos como electrónica, sensores y control encargados del procesamiento de información y la activación de la electrónica de potencia para los actuadores con el fin de emular los movimientos naturales de la articulación.

Para determinar la eficacia del diseño, primero se deben conocer los esfuerzos que serán realizados para posteriormente seleccionar los materiales que se van a utilizar, así como averiguar acerca de sus propiedades mecánicas, luego identificar la forma en que estos pueden ser adquiridos, lo siguiente es realizar el diseño mecánico por medio de un software de diseño y análisis CAD/CAE y por medio de la aplicación del MEF, determinar la resistencia a las cargas aplicadas en cada articulación, aunado a esto, se busca que se situé entre los más ligeros prototipos creados a partir de aleaciones metálicas y que la gamma de elementos que la conformen logren descomponerse de tal forma que ocupe un espacio reducido para guardar y transportar.

Conociendo los datos antropométricos de la población, así como una aproximación del peso máximo propuesto para la estructura, se obtiene el Par que cada una de las articulaciones ejerce en un caso extremo. Esto se logra a partir de considerar las extremidades del ser humano como palancas. En la tabla 2.1 se indican los valores obtenidos partiendo de considerar un peso máximo de la estructura de 20 kg, un peso del usuario de 80kg con una altura de 1.7m.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 2.1. Tabla es esfuerzos aplicados en las articulaciones y partes del cuerpo

EXTREMIDAD	LONGITUD (m)	PESO (kg)	FUERZA (N)	TORQUE (Nm)
PIE-TOBILLO	0.14	1.5	14.7	2.058
PIERNA-RODILLA	0.36	4.4	43.12	15.52
MUSLO-CADERA	0.4	10.1	98.98	39.59
TOTAL	0.9	16	156.8	57.17

Debido a que la propuesta del sistema mecánico será utilizada por y sobre una persona, este tendrá que ser lo más ligero y resistente posible, por lo que se realizó una investigación sobre los materiales utilizados en diferentes tipos de órtesis, en ellos se debe prestar atención a dos características fundamentales, una de ellas es el limite elástico, el cual permite conocer la carga máxima aplicada antes de generar un desplazamiento que produzca una deformación irreversible y disminuya su tiempo de vida útil, la otra característica de relevancia es la densidad que es la relación de peso por unidad de volumen [9, 10]. Gracias a esto, se realiza la propuesta de utilizar dos tipos de aleaciones de aluminio, 7075 y 6061 dado que tienen una alta resistencia a los esfuerzos y baja densidad que en conjunto brindan una estructura fuerte y ligera, sus datos técnicos se observan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades de las aleaciones de aluminio

MATERIAL	MODULO DE ELASTICIDAD (N/m^2)	FACTOR DE POISSON	DENSIDAD (kg/m^3)	LIMITE ELASTICO (N/m^2)	DILATACIÓN TERMICA (°C)
ALUMINIO 6061	$7e^{10}$	0.33	2700	$2.7e^{8}$	23.4
ALUMINIO 7075	$7.2e^{10}$	0.33	2800	$4.5e^{8}$	23.2

La forma comercial en que los materiales se encuentran disponibles en el mercado influye directamente en el diseño debido a que se debe considerar en que parte del sistema se utilizará, cuál es su función y adaptarse a sus características para lograr una armonía mecánica practica para su posterior manufactura. En el caso del aluminio 6061 se puede obtener en forma de perfiles comerciales de bajo costo que ayudan a aligerar el diseño gracias a que son huecos, mientras que el aluminio 7075 se encuentra en forma de bloques de diferentes espesores.

Con la información obtenida lo que procede es utilizar el Método de Elemento Finito, permitiendo conocer los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos sobre la o las piezas que conformen el sistema. El MEF aplicado a través de software de CAE consiste en discretizar el elemento en un número de muestras llamadas mayas, en donde cada punto de interconexión entre las mallas, también conocidos como nodos, representa una ecuación diferencial que deberá ser resuelta por el software de CAE. Los resultados del cómputo de las piezas se muestran de manera visual a través de una gama de colores sobre el elemento en donde los puntos rojos representan las zonas que son más susceptibles a las cargas, esto no quiere decir que alcanzan o rebasan el máximo de sus capacidades mecánicas. Mientras los valores máximos y mínimos de la tensión a la que son sometidos se muestran a un costado de la imagen del elemento analizado [10,11].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

Una vez seleccionado el tipo de material e identificado la forma en la que este será adquirido, se realizará el diseño del sistema que permita adecuarlos a las necesidades de movilidad y confort del paciente. El diseño y la ingeniaría se realiza utilizando el software de Catia V5. En la figura 3.1,b se muestra la propuesta de la estructura mecánica, que a través de un muñeco dummy con una altura de 1.76 metros y 36 cm de ancho en la cintura, se comprende de manera general la forma en que se acoplará a la persona, y como coinciden cada una de las articulaciones en las extremidades. El modelo cuenta con 6 grados de libertad distribuidos entre ambas extremidades sobre las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo, puede ajustarse la altura a distancias de 78, 84 y 90 cm dependiendo de las necesidades del usuario, además cuenta con un respaldo en la parte trasera que permite sostener la columna y con ello evitar molestias y malformaciones oseas. Un total de 186 piezas componen la estructura logrando alcanzar un peso de 9.54 kg.

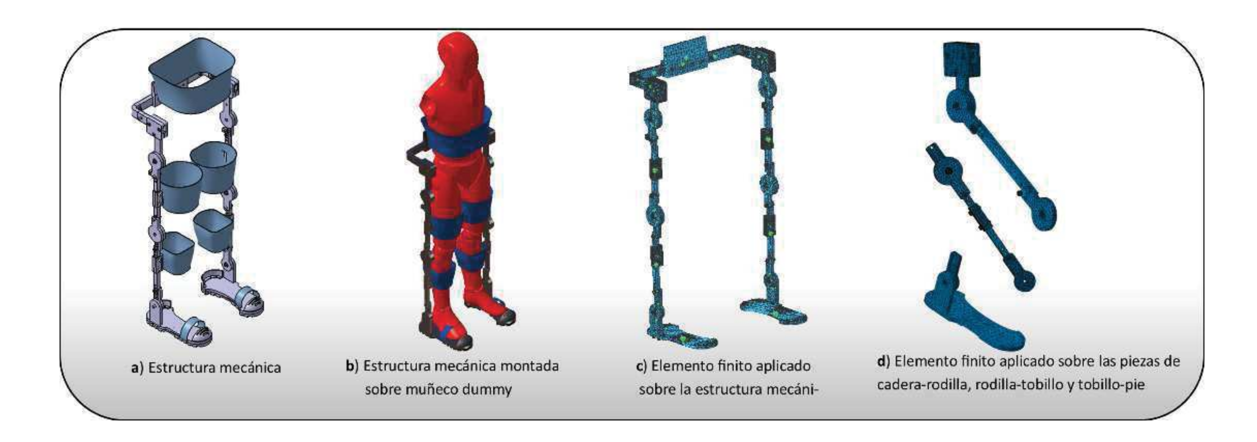


Figura 3.1 Modelo del sistema mecánico colocado sobre muñeco y aplicando el MEF.

Sobre las piezas que permiten la unión de las articulaciones se utiliza la aleación Al-7075 logrando una mayor resistencia a las cargas, esto se debe a que serán las encargadas de actuar el movimiento de las extremidades y se someterán a una tensión mayor. La unión de las articulaciones es por medio de perfiles con aleación de aluminio 6061. La colocación de arneses para sujetar las partes corporales debe ser en zonas específicas para no dañar la integridad física del paciente y realizar su función de forma adecuada.

En cada articulación se utilizan rodamientos que permiten el flujo del movimiento rotativo, estos rodamientos parten de la elección de los tornillos a utilizar. Los tornillos que mantienen en pie la estructura son de acero inoxidable de 8mm debido a su alta resistencia a impactos y a la corrosión son un elemento confiable con un límite elástico de 3.4e11 N/m^2 y se demostrará al aplicar el MEF. Cada articulación consta de dos rodamientos, uno que permite la sujeción del tornillo del eje con ambas piezas y el otro axial para la rotación.

La aplicación del MEF sobre la estructura permite una visión del comportamiento del sistema al momento de aplicar una carga. En la figura 3.1,d para una mejor apreciación una de las extremidades ha sido separada en cadera-rodilla, rodilla-tobillo y tobillo-pie, donde cada

ISBN: 978-607-9394-14-1.



articulación se ha sometido a las cargas mostradas en la tabla 2.1. En el caso de Catia V5, la información mecánica necesaria para la aplicación del MEF es la mostrada en la tabla 2.2. mientras que para los elementos de acero se utilizaron las propiedades que vienen por defecto en el software.

Los elementos principales que intervienen en las articulaciones son dos rodamientos de diferentes dimensiones, las piezas de soporte y sus respectivos tornillos para la unión entre sus piezas, además de los perfiles que unen cada una de ellas. El análisis realizado sobre las piezas aplicando las características mecánicas de los materiales pertinentes arrojan que entre los elementos con aleación de aluminio se alcanza una tensión máxima de 2.47e5 N/m^2 y se encuentra en el perfil de aleación Al-6061 que une las articulaciones de cadera y rodilla, mientras tanto, en la pieza que ayuda a realizar la rotación uniendo la parte superior de la cadera alcanza 2.7e8 N/m^2 de tensión, y por último en cuanto a las piezas de acero, el tornillo que se encarga de unir y sujetar la articulación de la cadera y que interactúa con uno de los rodamientos obtuvo 7.4e7 N/m^2.

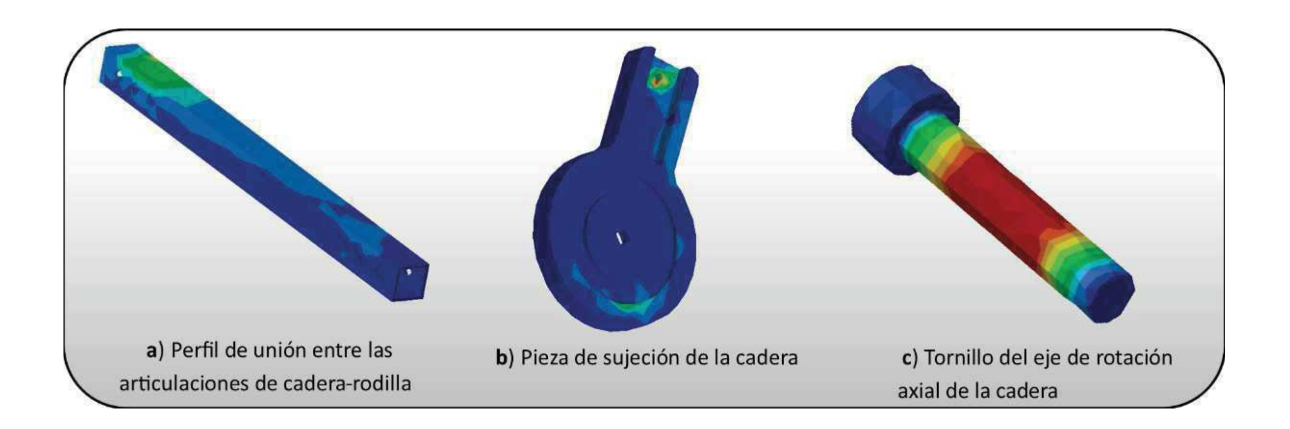


Figura 3.2 Piezas de la estructura sometidos al mayor esfuerzo dependiendo del material.

Tomando en cuenta esta información, queda demostrada la resistencia de los elementos a las cargas aplicadas, por lo que a continuación se muestra la construcción del sistema propuesto, en él se muestra un sistema en el que las partes pertinentes a la aleación de aluminio 7075 son impresas en 3D utilizando plástico PLA, este servirá de referencia para encontrar imperfecciones y comprobar la adaptabilidad de la órtesis. Los demás elementos como perfiles, rodamientos, tornillo y arneses se mantienen sin cambios. En la imagen 3.2 se observa la extremidad derecha del sistema construido, dicha estructura esta montada sobre un individuo de una altura de 1.68 m y por último muestra el espacio que ocupa una extremidad al ser separada por articulaciones.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



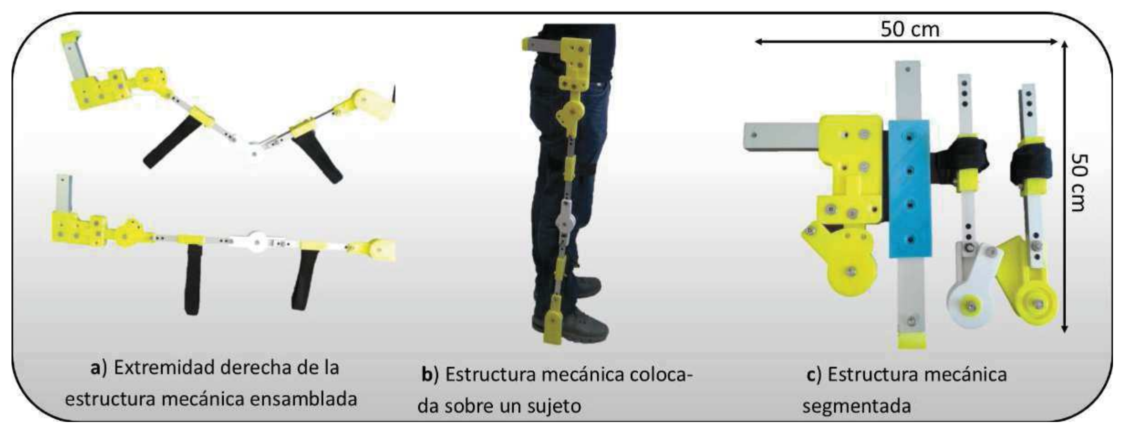


Figura 3.2 Sistema mecánico construido y colocado sobre una persona.

La estructura se ha colocado sobre un individuo a manera de identificar defectos e implementar mejoras en el diseño para su posterior manufactura utilizando todos los materiales propuestos. Hasta no haber concluido la etapa de diseño e involucrar los componentes eléctricos y electrónicos, no se realizarán pruebas sobre alguna persona a manera de prevención.

4. Conclusiones

El modelo realizado tiene como objetivo soportar los esfuerzos y emular los movimientos que trabajan en conjunto para el entrenamiento de la marcha en pacientes con déficit ambulatorio. En el desarrollo del artículo la eficiencia mecánica del prototipo se ve expuesta por medio de la comparación de las características de los materiales en las piezas sobre las que se ejerce un mayor esfuerzo por medio de la aplicación del Método de Elemento Finito sobre la extremidad derecha de la estructura.

Los centros de rehabilitación atienden a una persona diferente aproximadamente cada hora por lo que alterar las dimensiones del sistema mecánico permite adecuarse al cuerpo de cada persona que sea atendida. Además, el tamaño y la cantidad de elementos que une cada una de las articulaciones permite descomponer la estructura en diferentes combinaciones de elementos lo que se traduce en un espacio reducido de almacenamiento como se muestra en la figura 3.2,c y que de ser indispensable permite su transporte a otros centros de rehabilitación, comunidades lejanas o residencias particulares.

Como trabajo a futuro, una vez realizada la revisión del prototipo de la estructura mecánica que involucra dimensiones, adaptabilidad, conexiones y movimiento, las piezas elaboradas a partir de impresión 3D serán reemplazadas por piezas en aluminio 7075 maquiladas por medio una máquina de control numérico computacional (CNC).

Referencias

[1] Agudelo A., Briñez T., Guarín V., Ruiz J., Zapata M. “Marcha: descripción, métodos, herramientas de evaluación y parámetros de normalidad reportados en la literatura”. Fisioterapeuta, Centro de rehabilitación neurológica, Grupo empresarial JJ-JMG, departamento HSEQ, Revista CES movimiento Vol. 1, Barcelona, No. 1 2013.

[2] Camacho A., Esteban J., Paradas C., Paradas C. “Guía de enfermedades neuromusculares. Información y apoyo a las familias”. Federación Española de Enfermedades Neuromusculares, 2008.

[3] Pericé R., Riambau O., Paloma S. “Órtesis y prótesis del aparato locomotor, extremidad inferior”, Nombre de la revista. Editorial Masson, Barcelona y 1991.

[4] Levy A. “Ayudas a la marcha. En ortopodología y aparato locomotor. Ortopedia de pie y tobillo”, Editorial Masson, Barcelona,2003.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[5] CONADIS. “Estadísticas a propósito del día internacional de las personas con discapacidad (3 de diciembre)”, Aguascalientes, Ags. 2015.
[6] Salud y algo más “Peso en distintas partes del cuerpo”, Nombre de la revista. Editorial Masson, Barcelona y 1991.
[7] Taboadela C. “GONIOMETRÍA: Una herramienta para evaluación de las incapacidades laborales”. Editorial Masson, 1ª edición, Barcelona, 2017.
[8] “Educación física y deportes”, Revista digital, Biomecánica aplicada al deporte: contribuciones perspectivas y desafíos. Buenos Aires 2012.
[9] Newell, J. “Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería”. Ed. Alfaomega, 2016.
[10] Daryl L. “A first course in the Finite Element Method”. Universidad de Wisconsin-Platteville, 2012
[11] Vásquez J. “Análisis y diseño de piezas mecánicas con CATIA V5. Método de elementos finitos”. Ed. Alfaomega, 1ª ed., 2009.
[12] López F., Pacheco N. “Fundamentos del duraluminio”. Fundación universal de libertadores materiales, Bogotá, 2011.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 421-434.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Desarrollo de IPcore de Transformada Rápida de Fourier en FPGA para la Detección de Barras Rotas en Motores de Inducción

Zamudio Ramírez Israel (1), Osornio Ríos Roque Alfredo (1), Romero Troncoso René de Jesús (1), Ramírez Núñez Juan Angel (1) y Antonino Daviu Jose Alfonso (2)

(1) Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río
Universidad Autónoma de Querétaro
Av. Río Moctezuma 249, C.P. 76808, San Juan del Río, Querétaro, México, 4272741244

(2) Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universitat Politecnica de Valencia
Camino de Vera s/n, C.P. 46022, Valencia, España, 0034963877592

Resumen

Actualmente las exigencias en el mercado laboral demanda estudiantes de ingeniería mejor preparados capaces de proporcionar un alto rendimiento en la producción, donde el mantenimiento preventivo a motores de inducción es una de las actividades primordiales al ser ampliamente utilizados en la industria. Las barras rotas en motores de inducción han sido un tema de interés en los últimos años debido a que este tipo de fallas son muy silenciosas y las consecuencias de no atenderlas resulta en un consumo de energía mayor, vibraciones y fallas catastróficas del motor. El trabajo aquí presentado proporciona una técnica de valoración del estado de las barras del motor mediante el análisis de la firma de corriente y el análisis espectral de un sensor de campo magnético para motor con carga y sin carga como elementos de detección en el diagnóstico. El método propuesto realiza un estudio de la amplitud de frecuencias elegidas y las compara con aquellas de un motor sano. La metodología desarrollada es implementada en un arreglo de compuertas programables en campo con el propósito de ser empleado en aplicaciones de tiempo real al desarrollar un IP core dedicado a ello.

Palabras clave: Arreglo de compuertas programables en campo (FPGA), diagnóstico de fallas, barras rotas, IP core.

1. Introducción

En el campo de la industria, los motores de inducción han ganado gran importancia y han sido utilizados ampliamente como dispositivos electromecánicos para la conversión de energía al consumir más del 60% de ésta en cualquier nación industrial [1]. Este tipo de motores tienen un amplio campo de acción en sistemas mecatrónicos al usarse en la mayoría de tareas dentro del área de producción, por ejemplo, sistemas de inyección de plástico, prensas, bandas transportadoras y entre muchos otros. A pesar de su robustez, estos motores son susceptibles a fallas. De acuerdo a [2] la distribución de fallas en motores de inducción corresponde un 37% a fallas relacionadas con el estator, 41% en relación a cojinetes, 10% a barras rotas y 12% otras fallas. A pesar de que fallas en barras rotas (BR) representan un 10% del total de fallas en motores de inducción, éstas han recibido especial atención, ya que, al presentarse dicho problema en el motor, éste puede continuar operando con aparente normalidad; mas, sin embargo, en cierto punto la falla puede causar daños severos al motor, cuestión por la cual consumen más energía y/o generan disturbios eléctricos que incrementan los costos de facturación en las empresas [3]. Con el fin de obtener información relevante para un buen diagnóstico, la transformada de Fourier es empleada como herramienta de análisis debido a su excelente

ISBN: 978-607-9394-14-1.



desempeño para tratar señales estacionarias y al hecho de que nuevas componentes frecuenciales son asociadas con la falla estudiada, sin embargo, la mayoría de los análisis o su aplicación se han realizado fuera de línea por lo que para lograr un diagnóstico oportuno y en línea se hace necesario un procesamiento de señal de forma rápida y eficiente, siendo los dispositivos complejos lógicos programables (CPLD), como el arreglo de compuertas programables en campo (FPGA) una herramienta óptima para tales tareas y de bajo costo, además que el desarrollo de IP cores propios tiene la novedad, en comparación con los analizadores de espectro de uso general, que se encuentran disponibles comercialmente, de poder analizar simultáneamente distintos canales (corriente, campo magnético).

Muchos estudios basados en la transformada rápida de Fourier (FFT) se han llevado a cabo a lo largo de los años para detectar barras rotas como en [4-6] donde se emplea el análisis de la firma de corriente del motor (MCSA) basado en FFT para observar el espectro de dichas corrientes y emplearlas para diagnosticar fallas de BR y del devanado del estator, de la misma manera en [7] se hace uso de un dispositivo FPGA para realizar detección en línea de fallas de BR aplicando transformada de Fourier a lecturas de corriente y mediante comparadores descritos dentro del FPGA hacer el diagnóstico, sin embargo, solo se emplea una señal para el análisis del fallo siendo susceptible a cambios en la carga y voltaje de alimentación del motor. Otros como [8] emplean señales de campo magnético externo para analizar el estado de las barras del motor al procesar dicha señal con FFT y observar cambios en su espectro. En [9] se hace una comparación entre el uso de MCSA y lecturas de vibración para determinar el estado de las barras, concluyendo que es recomendable usar MCSA cuando la carga del motor es significante mientras que el análisis de vibraciones arroja buenos resultados en regímenes de poca carga. La superioridad de las técnicas de diagnóstico basadas en el análisis FFT de componentes de corriente de banda lateral se demuestra al comparar el rendimiento de diferentes procedimientos de diagnóstico para detectar y cuantificar BR en máquinas de inducción [10], más sin embargo existe el problema de falsos positivos o falsos negativos al emplear sólo señales de corriente para diagnosticar el estado de las barras del motor [11]. Con el fin de atacar estos problemas algunos autores proponen hacer una combinación de fuentes de información para incrementar la exactitud en el diagnóstico, así entonces en [12] se plantea un algoritmo para la detección de barras rotas correlacionando espectros de lecturas de vibración y corriente para mostrar un diagnóstico del motor. En [13] los autores emplean MCSA y la técnica de descomposición en modo empírico (EMD) para diagnosticar barras en motores de inducción. Así pues, las recientes tendencias en el monitoreo del estado de motores eléctricos es combinar la información obtenida del análisis de diferentes señales para incrementar la confiabilidad y exactitud del diagnóstico que, sin embargo, requiere de muchos cálculos computacionales y el procesamiento de la información demanda una gran cantidad de tiempo, lo cual contrasta con uno de los objetivos principales en el mantenimiento de éstos, la detección de fallas tan pronto como sea posible. Del mismo modo, es claro el imprescindible uso de técnicas de procesamiento de señal para realizar un diagnóstico final acerca del estado del motor bajo estudio, tales como transformada de Fourier. Por otro lado, la propuesta de emplear una combinación de señales de campo magnético y corriente para llevar a cabo el diagnóstico y hacer más robusto el sistema es novedoso en el área.

Derivado de esto y en conocimiento que BR en motores de inducción es una de las fallas más silenciosas y comunes en este tipo de motores, en el presente trabajo se propone emplear dispositivos complejos de lógica programable como el FPGA que permitan realizar un procesamiento de señal masivo de manera rápida, mejorando así los tiempos y disminuyendo la carga computacional del procesamiento de la señal para generar un diagnóstico constante y en línea acerca del estado del motor analizado a un bajo costo y de manera oportuna desarrollando estructuras digitales especiales para ello. Además, para mejorar la confiabilidad del diagnóstico se propone emplear señales de corriente y flujo magnético en un análisis simultáneo.

2. Materiales y métodos.

A continuación, se hará una revisión de los conceptos requeridos para el desarrollo del presente trabajo de investigación.



2.1 Componentes de banda lateral para detección de fallas de BR en motores de inducción.

El procedimiento seguido para el diagnóstico del estado de las barras en motores de inducción empleando la transformada de Fourier a señales de corriente recae en las componentes de banda lateral que aparecen en situación de BR, de acuerdo a [14] dichas bandas frecuenciales vienen dadas por la ecuación *(1):*

$$f_b=f_1(1\pm 2s) \qquad (1)$$

Donde:
f_b: Frecuencia de banda lateral [Hz].
f_1: Frecuencia de alimentación [Hz].
s: Deslizamiento.

Además, el deslizamiento s de un motor de inducción es la diferencia entre la velocidad mecánica a la cual gira el rotor del motor n_m y la velocidad de rotación del campo magnético del estator n_s que se define como la ecuación (2).

$$s=\frac{n_s-n_m}{n_s} \qquad (2)$$

Para una carga mecánica completa de motor, el deslizamiento s es máximo y la separación entre f_1 y frecuencias de banda lateral f_s es máxima (ver Figura 1a), sin embargo, para un motor sin carga mecánica, s es minima y f_s se aproxima a f_1 (ver Figura 1b).

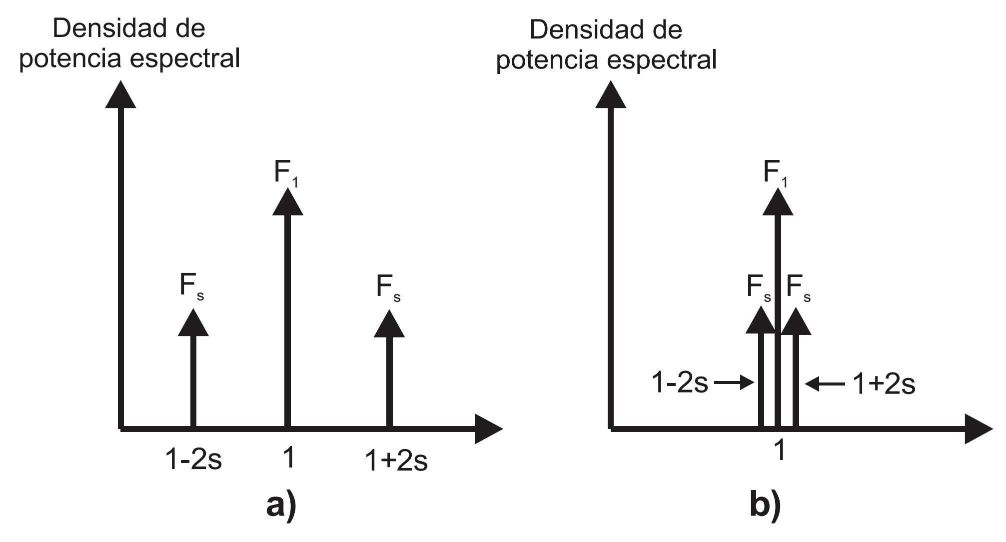


Figura 1. Frecuencias características de motores de inducción en condición de barras rotas, a) motor completamente con carga, b) motor sin carga.

2.2 Transformada de Fourier.

La transformada de Fourier es una transformación matemática que permite pasar señales entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Una función en el dominio del tiempo muestra la variación de la amplitud de una señal en el tiempo, mientras que la representación en el dominio de la frecuencia permite conocer que tan a menudo se presentan estos cambios. El paso del dominio de tiempo al de frecuencia se puede visualizar considerando que la señal bajo estudio está compuesta por la suma de ondas sinusoidales simples de amplitud $x(t)$ y frecuencia angular ω como en la ecuación (3).

$$X(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}\, dt \qquad (3)$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 421-434.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



La Figura 2 muestra la señal $x(t) = \cos(2\pi * 5t) + \cos(2\pi * 10t) + \cos(2\pi * 20t) + \cos(2\pi * 50t)$ que se encuentra en función del tiempo y su descomposición en sinusoides de cierta frecuencia que la integran a través de transformada de Fourier.

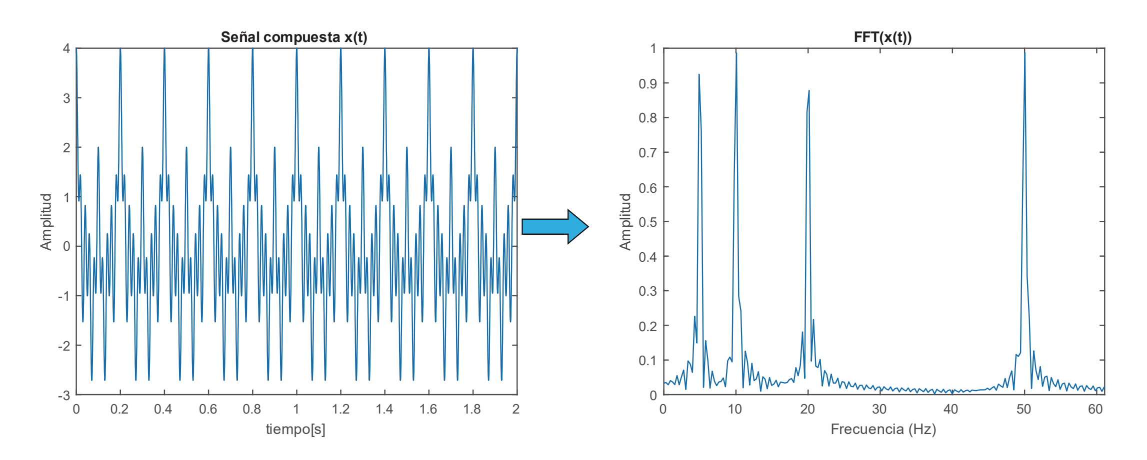


Figura 2. Ejemplo de uso transformada de Fourier.

2.3 Transformada discreta de Fourier (DFT) y transformada rápida de Fourier (FFT).

La transformada Discreta de Fourier toma una secuencia de datos *N* muestreados de la señal y calcula el contenido de frecuencia de ésta representando estos datos en el dominio de la frecuencia de forma discreta $x[k]$ al multiplicar la señal en tiempo discreto $x[n]$ por el kernel de multiplicación. La DFT para señales en tiempo discreto se representa matemáticamente mediante la ecuación (4).

$$X[k]=\sum_{0}^{N-1} x[n]e^{\frac{j2\pi}{N}kn} \qquad 0\leq k\leq N-1 \tag{4}$$

Donde j indica la parte imaginaria de un número complejo.

Aunque la DFT es una herramienta muy útil, su implementación involucra un número de sumas y multiplicaciones complejas que es proporcional a N^2. El término $e^{\frac{j2\pi}{N}}$ puede ser precalculado y almacenado en una tabla para un acceso rápido. El algoritmo FFT está basado en el método denominado "doblamiento sucesivo", simplificando la ecuación (4) como la ecuación (5):

$$X[k] = \sum_{0}^{N-1} x[n]W_n^{kn} \tag{5}$$

Donde: $W_n^{kn} = e^{-\frac{j2\pi}{N}kn}$.

De acuerdo a [15] el algoritmo FFT diezmado en frecuencia se puede escribir como la ecuación (6):

$$X[2k] = \sum_{n=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} g_1[n]W_{\frac{N}{2}}^{kn}$$
$$x[2k+1] = \sum_{n=0}^{\left(\frac{N}{2}\right)-1} g_2[n]W_{\frac{N}{2}}^{kn} \tag{6}$$

Donde:

$$g_1[n] = x[n] + x\left[n + \frac{N}{2}\right]$$
$$g_2[n] = \left[x[n] - x\left[n + \frac{N}{2}\right]\right]W_N^n,\ n = 0,1,\dots,\frac{N}{2} - 1$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 33, pp. 421-434.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la parte superior de la Figura 3 se muestra el cómputo de $g_1[n]$ y $g_2[n]$ de manera simultánea, a lo que se conoce como mariposa simple de decimación en frecuencia, de la misma forma en la parte inferior se observa la arquitectura digital desarrollada para el cálculo de dicha mariposa. Sabiendo que el método de la FFT es del tipo iterativo, y que el resultado de la mariposa diezmado en frecuencia es un número complejo, es necesario considerar que sus entradas son igualmente complejas, por lo que, por cuestiones de simplicidad aquí se hace un cambio de variable; $x[n] = a = a_0 + jb_0$ y $x\left[n + \frac{N}{2}\right] = b = a_1 + jb_1$.

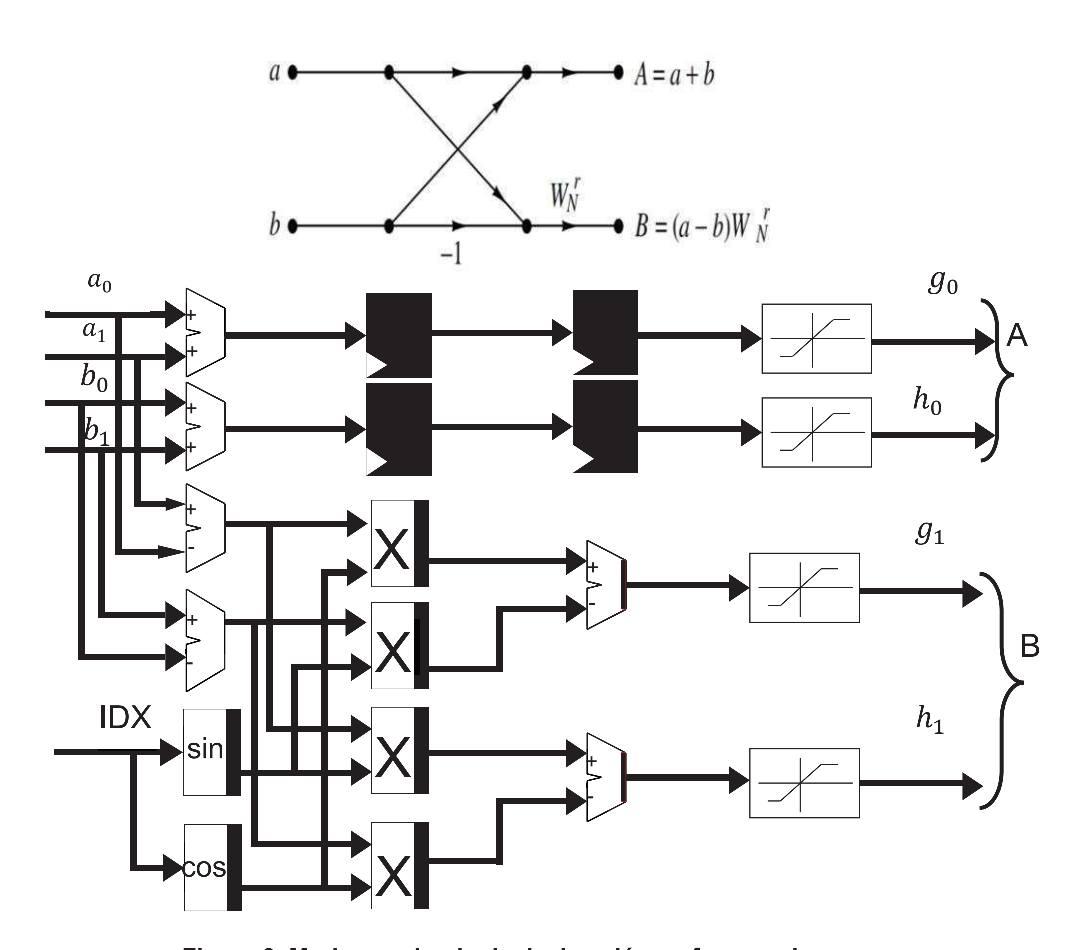


Figura 3. Mariposa simple de decimación en frecuencia.

2.4 Estructura digital módulo FFT.

La Figura 4 muestra la estructura digital del módulo FFT, en ella se puede apreciar el trayecto que siguen los datos para realizar el cálculo. La información de lecturas de señal ingresa por el puerto $DiRe$ y se van almacenando en el $Puerto\ A$ de la memoria RAM de acuerdo a la dirección seleccionada por la señal del contador ADA. Una vez se completa la cantidad de puntos de la ventana, se activa la señal cs y el generador de direcciones comienza a indicar a la mariposa decimación en frecuencia descrita en el apartado 2.3 qué valores procesar, así los resultados se van almacenando en la memoria RAM para después ser enviados a las salidas $DoRe$ y $DoIm$.



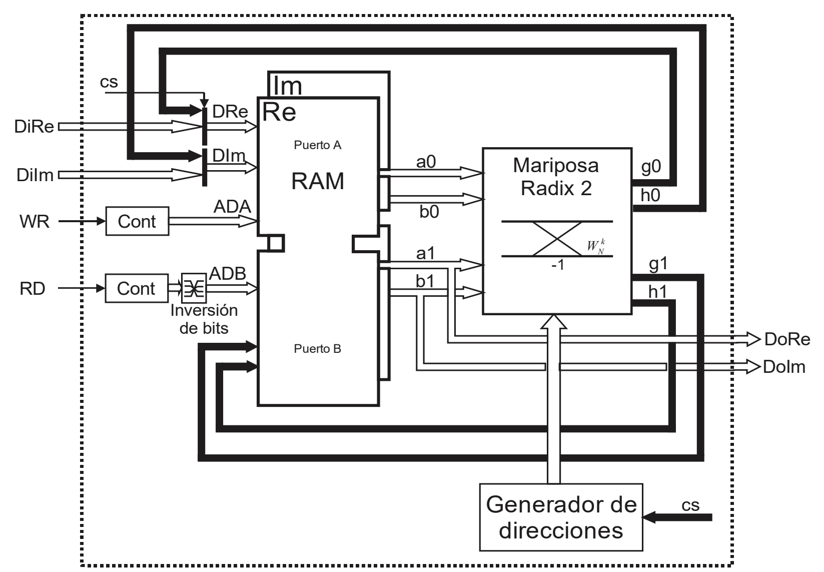


Figura 4. Ruta de datos módulo FFT.

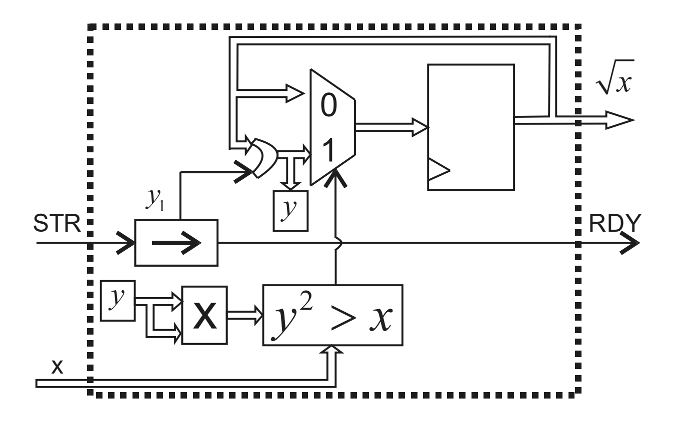
2.5 Arquitectura digital para cálculo de valor absoluto de dos señales.

Como puede apreciarse en la ecuación (5), el cálculo de la FFT se representa mediante números complejos, por lo que, para obtener el espectro de Fourier a través de la FFT es necesario calcular el valor absoluto o magnitud de estos valores a través de la ecuación (7) asumiendo que dicho número complejo es representado mediante $DoRe$ y $DoIm$ para simbolizar la parte real y la parte imaginaria respectivamente:

$$|X[k]| = \sqrt{DoRe^2 + DoIm^2} \tag{7}$$

De la ecuación (7) se tiene que dicho cálculo requiere una suma, cuatro multiplicaciones y el cómputo matemático de la raíz cuadrada. Para calcular la raíz cuadrada a través de un dispositivo digital es posible emplear el método de aproximaciones sucesivas como se describe en [16], donde se plantea dar solución a la ecuación (8) proponiendo valores de y y elevarlos al cuadrado hasta aproximarse a x, de tal manera que se comienza por y_1 que es equivalente a la mitad del rango posible a representar con la cantidad de bits elegida. Si $y^2 > x$ se mantiene el valor de y propuesto, en caso contrario se le suma la mitad de rango restante mediante un corrimiento. La Figura 5, muestra la arquitectura propuesta para computar la raíz cuadrada y de x, donde STR es la bandera de inicio y RDY la bandera de fin del cálculo.

$$y = \sqrt{x} \ \therefore y^2 = x \tag{8}$$



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 5. Arquitectura digital para el cálculo de la raíz cuadrada.

2.6 Unidad de toma de decisiones.

Para automatizar el proceso de diagnóstico del estado de barras del motor bajo análisis es necesario un módulo encargado de verificar la información obtenida de la FFT del sensor de campo magnético y sensor de corriente. Es así como se propone emplear un árbol de toma de decisiones en el que se comparan las amplitudes A_1, A_2, A_3 de las frecuencias seleccionadas para el caso de sensor de campo magnético, sensor de corriente para motor con carga y sensor de corriente motor sin carga, respectivamente contra umbrales U_1,U_2,U_3 comunes y calibrados de motor sano para sensor de campo magnético, sensor de corriente motor con carga y sensor de corriente motor sin carga, respectivamente. La Figura 6 muestra la implementación de la unidad de toma de decisiones.

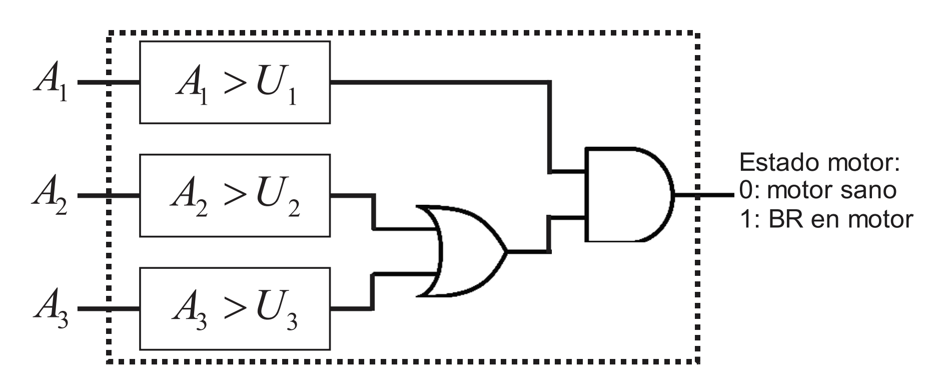
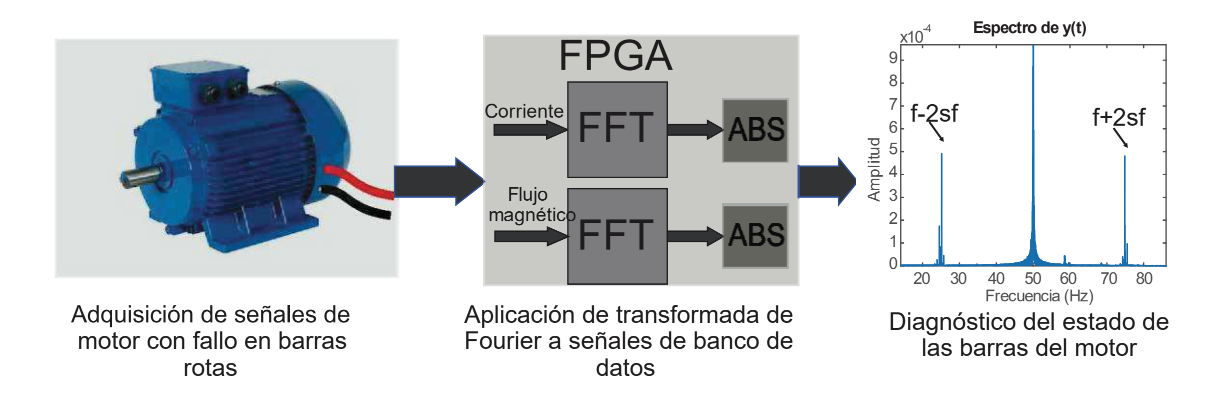


Figura 6. Arquitectura digital de unidad de toma de decisiones.

3. Metodología

En la Figura 7 se muestra un diagrama a bloques que integra la metodología propuesta en el presente trabajo, en dicho diagrama se observa el uso del IP core FFT para realizar la detección de barras rotas. En la primera etapa se guarda un banco de datos conteniendo toda la información de lecturas de corriente y flujo magnético adquiridas de un motor con fallas de barras rotas y con diferentes severidades de fallo. Después se toma ese banco de datos de lecturas para procesarlas a través del módulo FFT. Una vez procesada la información por el módulo FFT, es necesario realizar la operación matemática del valor absoluto a dichas salidas, puesto que el resultado de la FFT es un valor complejo. Como tercera etapa, se aíslan las componentes de interés de acuerdo a la ecuación (1) con el fin de ofrecer un diagnóstico acerca del estado de las barras del motor bajo análisis, cuyo resultado puede ser examinado por un bloque de toma de decisiones que simplemente indica la condición del motor bajo dos posibles valores: motor en buen estado o motor con falla de BR.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 7. Diagrama a bloques de metodología a seguir.

Para la creación del IP core FFT y obtener el archivo sintetizado de las arquitecturas digitales que componen el módulo mediante descripción en hardware (VHDL o verilog) se emplea el software Xilinx ® ISE 14 siguiendo el diagrama a bloques mostrado en la Figura 8.

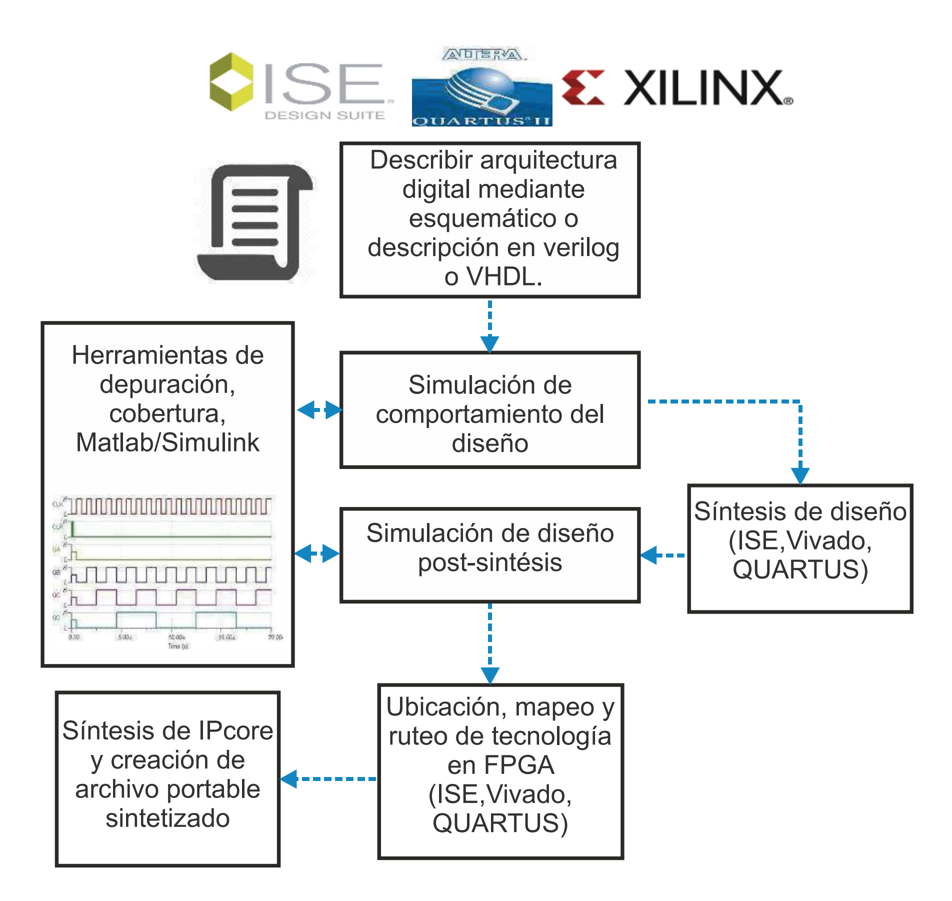


Figura 8. Diagrama de flujo para creación de IPcore sintetizado.

Una vez creado el archivo portable sintetizado de la arquitectura digital (IP core), este será usado para generar una arquitectura digital de mayor jerarquía con el propósito de reproducir el IP core desarrollado y así poder analizar dos señales de forma simultánea descargando a un dispositivo FPGA, mediante un cable de programación JTAG (Grupo de acción conjunta de prueba por su acrónimo en inglés), el archivo de configuración generado por el software especializado de la familia FPGA empleada y así tener un sistema en chip (SOC) de propósito especial para una operación en línea.

4. Experimentación

Para validar el algoritmo implementado, se realizaron varias pruebas a un banco de datos obtenido a partir de lecturas tomadas por un osciloscopio YOKOWAGA modelo DL850 de señales de corriente de línea y un sensor de campo magnético colocado delante del motor de inducción trifásico bajo prueba de 1 HP, para procesarlas por el módulo IP core FFT realizado en HDL, en la Figura 10 se muestra el motor empleado y la configuración del sensor de campo magnético. Las lecturas se tomaron con el motor bajo carga mecánica y sin ella para diferentes condiciones del rotor: barra sana, una barra rota y dos barras rotas. Las medidas de corriente se detectan a través de medidores de pinza estándar y el sensor de campo magnético es un sensor semejante a una bobina. La frecuencia

ISBN: 978-607-9394-14-1.



de muestreo se establece en 1.5 KHz. La Figura 11 muestra la integración del módulo FFT y el banco de datos en conjunto con las señales de control para su buen funcionamiento.

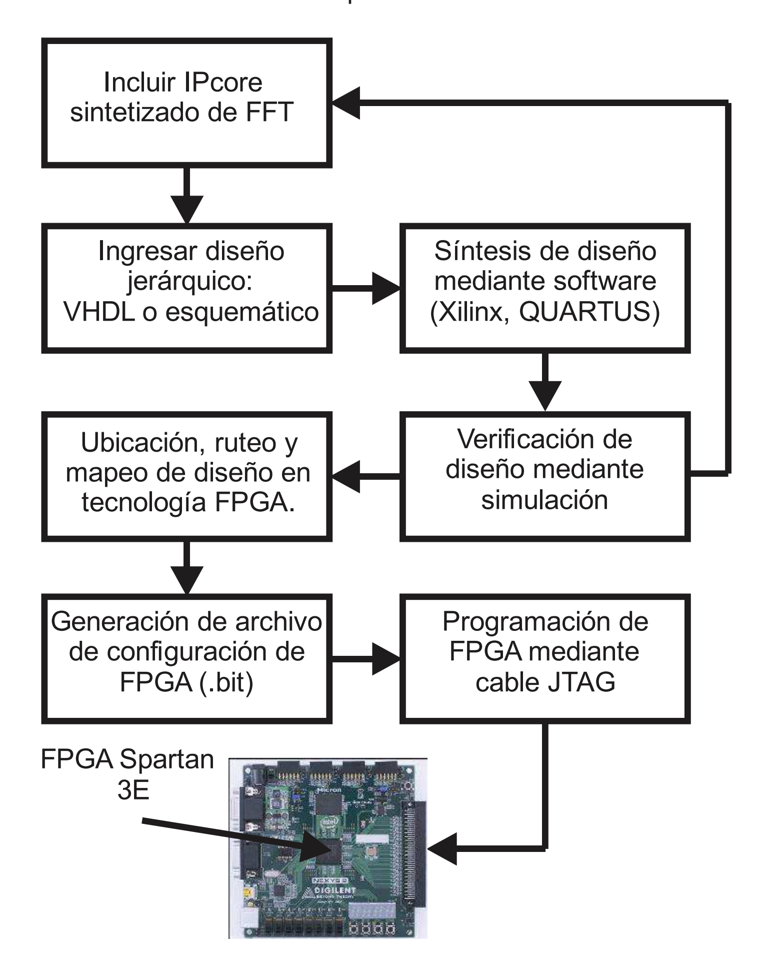


Figura 9. Diagrama de flujo para configuración y programación de FPGA a partir de arquitectura digital descrita mediante software.

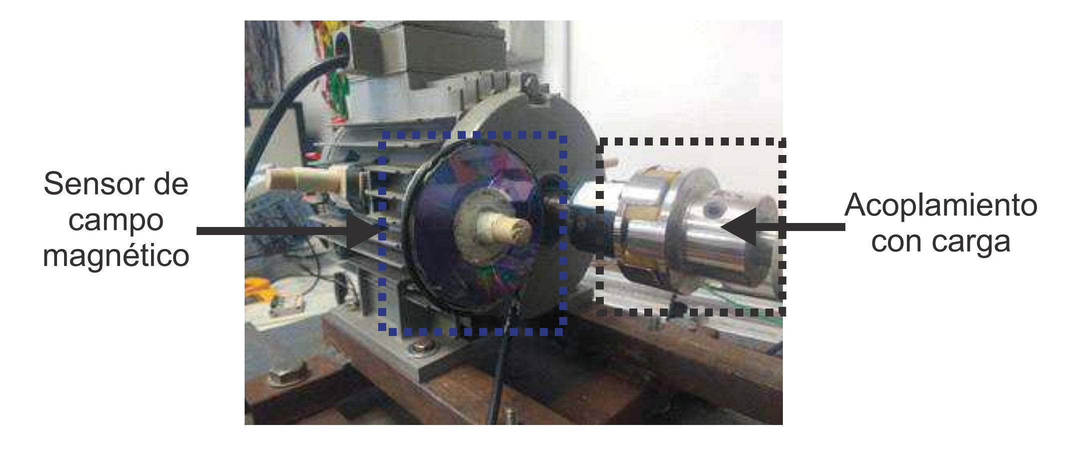


Figura 10. Configuración de motor para toma de lecturas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Las señales de control son aquellas que requiere el módulo para operar de manera correcta y así poder sincronizarse con otros módulos en arquitecturas jerárquicas. Además, para el proceso completo del cálculo, el puerto RST es activado mediante un pulso en alto para mandar todos los registros a los valores de inicio, el puerto CLK denota la señal de reloj con la cual se sincroniza el módulo completo, después mediante la señal WR se le indica al módulo el momento en que se requiere guardar un nuevo valor que puede ser una nueva lectura del sensor empleado, una vez se tenga la cantidad de lecturas equivalente al tamaño de la ventana indicada por el usuario, el módulo manda una señal FW, indicando una lectura completa de datos. Posteriormente se le indica al módulo el comienzo del cálculo a través de la señal STR, el cual devolverá una señal RDY de cálculo completo, indicando así que los registros de salida DoRe y DoIm, parte real e imaginaria, respectivamente, se encuentran disponibles.

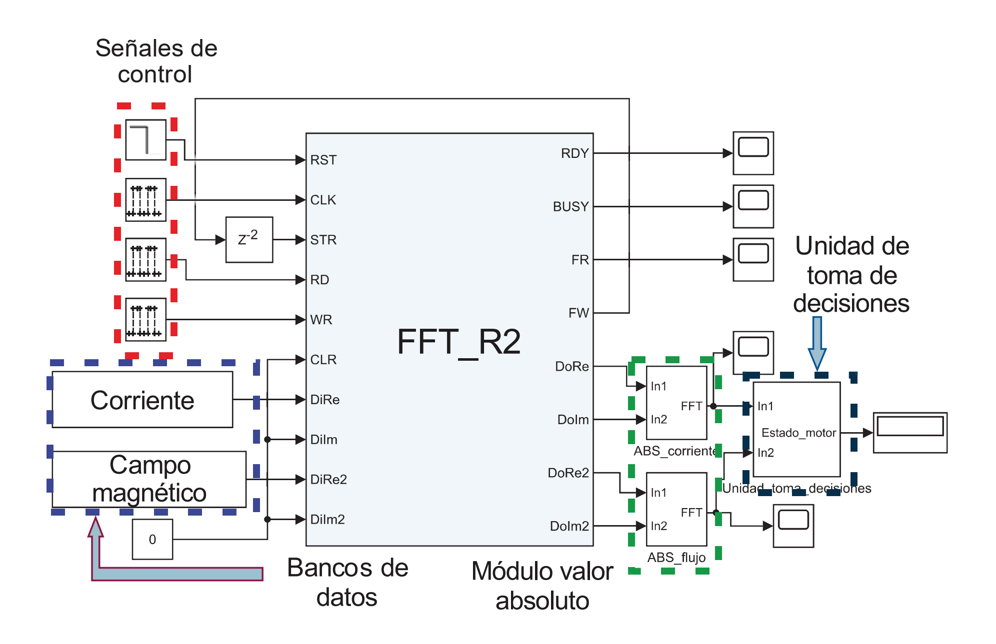


Figura 11. Integración de IPcore FFT con banco de datos.

5. Resultados

Se empleó un motor de inducción de 1 HP con diferentes condiciones como casos de estudio: barra sana, una barra rota y dos barras rotas. Para los tres casos, se aplicó la FFT empleando el IPcore desarrollado para validar el funcionamiento del módulo a través de una base de datos previamente almacenada. En la Figura 12 se muestran las gráficas de espectro del sensor de campo magnético (Figura 12a) y espectro del sensor de corriente (Figura 12b) obtenidas al emplear el IPcore sobre las señales recopiladas para el caso de motor sano. Como se puede apreciar, los resultados arrojan una señal con una componente que corresponde a la frecuencia de alimentación.

Por otra parte, la Figura 13 muestra las gráficas obtenidas para el caso de motor con una barra rota. Como es de esperarse, cuando el motor se encuentra sin carga (Figura 13a) las componentes de banda lateral, se encuentran muy cercanas a la frecuencia de alimentación (50 Hz) para el caso del sensor de corriente, sin en cambio, al analizar los resultados del espectro de Fourier de la señal de campo magnético se nota cómo las componentes resaltadas en rojo no se ven afectadas en la frecuencia de aparición para condiciones diferentes de carga, sin embargo, sí muestran un cambio en su magnitud.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



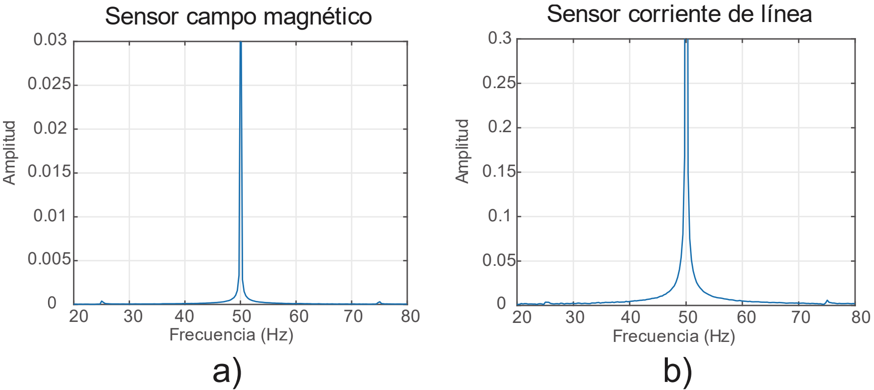


Figura 12. Espectro de Fourier de señales de a) sensor de flujo magnético y b) corriente de motor sano.

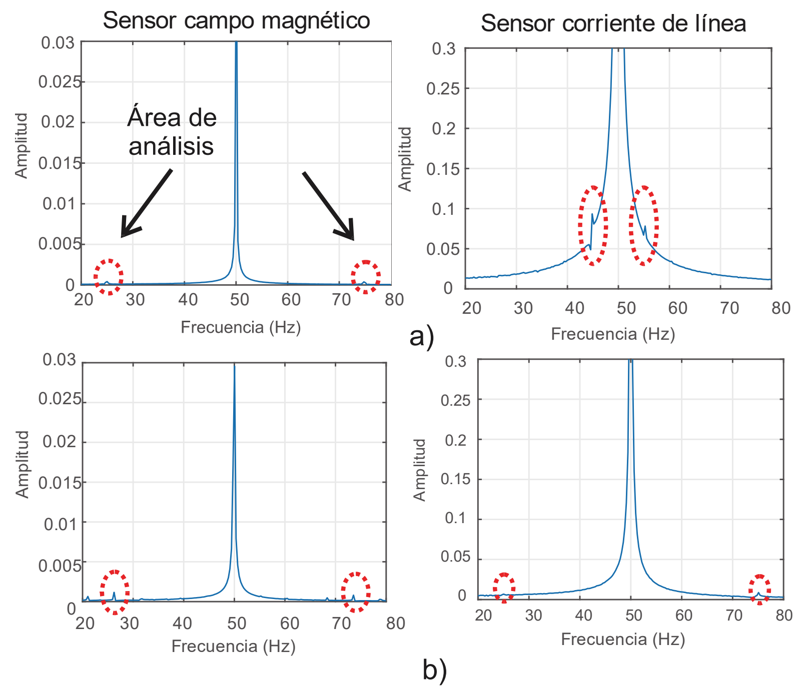


Figura 13. Espectro de Fourier de señales de sensor de flujo magnético y corriente de motor con una barra rota sin carga (a), con carga (b).

Para el caso de dos barras rotas ocurre una situación similar que para una barra rota, ya que, aparecen componentes cercanas a la frecuencia de alimentación para el caso de lecturas de corriente, sin en cambio, sus amplitudes son mayores que las de una barra rota (ver Figura 14). Por otro lado, los espectros de señal de campo magnético son semejantes a los de una barra rota con la única diferencia que las amplitudes son mayores para el caso de dos barras rotas y cuando el motor se encuentra con carga (Figura 14b).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



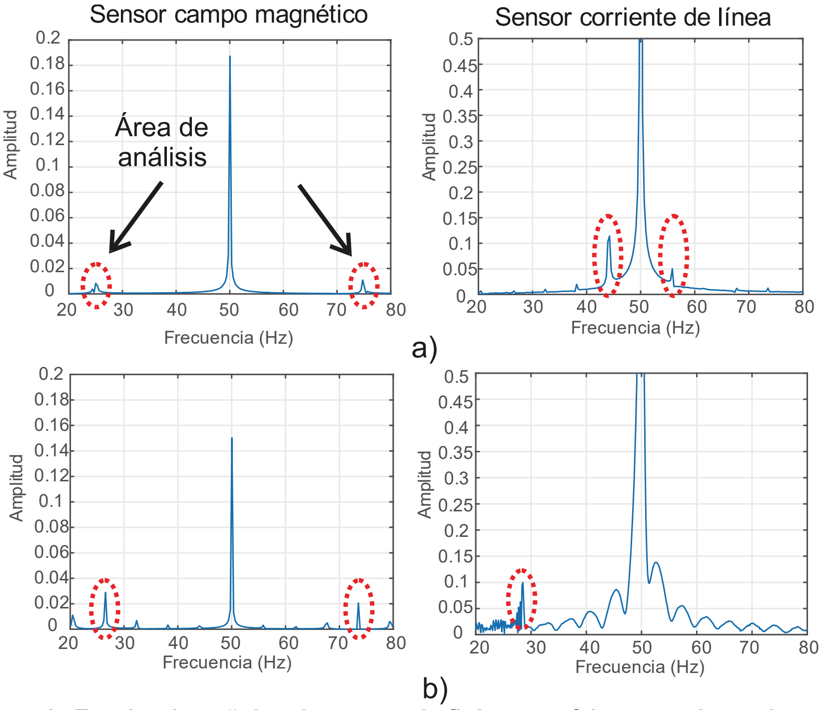


Figura 14. Espectro de Fourier de señales de sensor de flujo magnético y corriente de motor con dos barras rotas sin carga (a), con carga (b).

Los recursos implementados en dispositivo Spartan3E-1600 reportados por Xilinx ® ISE 14.2 synthesis tool se encuentran resumidos en la Tabla 1 para el IPcore FFT de 1024 puntos, 12 bits exclusivamente.

Tabla 1. Resumen de utilización de dispositivo Spartan3E-1600

Utilización lógica	Usado	Disponible	Utilización
Número de Slices	640	14752	4%
Número de Slice Flip Flops	260	29504	1%
Número de LUTs de 4 entradas	1166	29504	3%
Número de BRAMs	2	36	5%
Número de MULT 18X 18SIOs	4	36	11%
Número de GCLKs	1	24	4%

El desempeño en tiempo de computo del IPcore FFT puede ser estimado por el número total de ciclos requeridos para el cálculo de una señal de entrada de 1024 puntos. Hay 10 etapas de mariposa, e, 256 mariposas complejas individuales, m. Cada mariposa requiere 4 ciclos de reloj, c. Por lo tanto, el número total de ciclos, L, está dado por la ecuación (7).

$$L = emc = 10(256)4 = 10240 \quad (7)$$



6. Conclusiones

La funcionalidad básica del IPcore FFT se ha demostrado a través del estudio de casos de espectros de señales de motores sanos, una barra rota y dos barras rotas. Además, se propuso una nueva metodología para la detección de barras rotas de motores de inducción con y sin carga mecánica al analizar los espectros de señales de un sensor de campo magnético y uno de corriente de línea. Se demostró que las componentes bajo estudio para el caso de motor con dos barras rotas tienen una mayor amplitud en el espectro del sensor de campo magnético que para el caso de una barra rota y motor sano, sin en cambio, éstas componentes no modifican su frecuencia de aparición cuando el motor se encuentra con carga o sin ella como en el caso del espectro del sensor de corriente, con ello el diagnóstico se vuelve más robusto ya que al analizar solo espectros de corriente se pueden generar falsos positivos o falsos negativos.

Como contribución de este trabajo, el algoritmo propuesto, aunque complejo en carga computacional es implementado en un FPGA de bajo costo, lo cual genera un sistema en chip (SOC) de propósito especial para una operación en línea.

La síntesis del IP core FFT desarrollado para 1024 puntos reportados por Xilinx ® ISE 14 en un dispositivo Spartan3E-1600 muestra que la máxima utilización de recursos internos es del 11% y que corresponden a los multiplicadores dedicados (uno de los elementos más utilizados comúnmente) dejando un total de 34 multiplicadores libres.

Como trabajo a futuro, los autores proponen diagnosticar la severidad de la falla en las barras de un motor de inducción cuando se presente este fallo empleando el IPCore desarrollado e implementando un módulo de toma de decisiones más robusto capaz de indicar qué tan grave se encuentra el estado de la falla de la barra.

Referencias

[1] Al Badawi F. y AlMuhaini M. "*Reliability modelling and assessment of electric motor driven systems in hydrocarbon industries*" IET Electric Power Applications, 9(9), 605-611, 2015.

[2] IEEE Motor Reliability Working Group. "*Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations*". IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. IA-21, no. 4. 1986.

[3] Grande J., Morales C., Rangel J., y Peregrina H. "*Half-broken bar detection using MCSA and statistical analysis*". Power, Electronics and Computing (ROPEC), IEEE International Autumn Meeting on (pp. 1-5), 2017.

[4] Thomson W. y Fenger M. "*Current signature analysis to detect induction motor faults*" IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 7, no. 4, pp. 26–34, Jul./Ago. 2001.

[5] Ishkova I., Vítek, O. "*Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis*". Electric Power Engineering (EPE),16th International Scientific Conference on (pp. 682-686), 2015.

[6] Jung J., Lee J., y Kwon B. "*Online diagnosis of induction motors using MCSA*". IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 6, pp. 1842– 1852, Dic. 2006.

[7] Rangel J., Peregrina H., Ramírez J., Gómez P., y Morales R. "*FPGA-based broken bars detection on induction motors under different load using motor current signature analysis and mathematical morphology*". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 63(5), 1032-1040., 2014.

[8] Ceban A., Pusca R., y Romary R. "*Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis*". IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, May 2012.

[9] Oviedo S., Quiroga J., y Borras, C. "*Experimental evaluation of motor current signature and vibration analysis for rotor broken bars detection in an induction motor*". Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), International Conference on (pp. 1-6), 2011.

[10] Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., y Kliman G. "*Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis*". IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 5, pp. 1248–1255, Sep./Oct. 2001.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[11] Antonino J., Lee S., y Wiedenbrug E. *"Reliable detection of rotor bar failures in induction motors operating in petrochemical plants*". Petroleum and Chemical Industry Conference Europe, (pp. 1-9), 2014.

[12] Rangel J., Romero R., Contreras L. y Garcia A. "*FPGA implementation of a novel algorithm for on-line bar breakage detection on induction motors*". Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE (pp. 720-725), 2008.

[13] Valles R., Rangel J., Ramirez J., Peregrina H., y Morales R. "*Broken bar detection on squirrel cage induction motors with MCSA and EMD*". Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, IEEE International (pp. 993-99), 2014.

[14] Thomson W., Y Fenger M. "*Current signature analysis to detect induction motor faults*". IEEE Industry Applications Magazine, 7(4), 26-34.

[15] Proakis J., y Manolakis D. "*Digital signal processing*". Pearson editorial, Estados Unidos de América, cuarta edición, 2013.

[16] Bellman R., Cooke K., y Lockett J. "*Algorithms, Graphs, and Computers*". Academic Press, Estados Unidos de América,1970.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 435-450.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Análisis de la Influencia de Recubrimientos Base Nitruro en un Proceso de Embutido Profundo en Sustitución de Agentes Lubricantes

Hernández Leyva Victor Hugo *, Mondragón Rodríguez Guillermo César[1], Dorantes Campuzano Ariel[1] y Benavidez Luna Lucero[2]

*CIATEQ. A.C., Sección de estudios de posgrado ([1]), Querétaro, Qro. CP. 76150
[1]Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro, Qro. CP 76125
[2]Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos

Resumen

Los tratamientos superficiales y recubrimientos tipo PVD sobre metales, son parte de la introducción de nuevos productos y nuevas tecnologías en los procesos de manufactura avanzada de diversos sectores en México, son un enlace entre el producto final y el medio ambiente, un recubrimiento protege a las herramientas de trabajo, en este caso al troquel, de condiciones de corrosión, desgaste, humedad, además de mejorar el rendimiento de las herramientas y su durabilidad.

Los beneficios de aplicar recubrimientos duros sobre las herramientas empleadas en los procesos de estampado se estima serán considerables, ya que muchos defectos de formabilidad en el producto final están asociados a fenómenos de fricción y desgaste especialmente en el proceso de embutido profundo. Se ha identificado que la fricción es una condición que estará siempre presente en los procesos de formado, considerando el embutido durante la etapa de deformación de la lámina y la calidad del producto estará afectada por el exceso o ausencia de fuerza de fricción en zonas críticas del producto, para tratar de controlar estos efectos se usan agentes lubricantes líquidos, frenos y pisadores. Los agentes lubricantes se usan en el embutido ya que se trabaja el material muy cerca de su límite máximo de formabilidad, es decir cualquier alteración de la fricción provocará un defecto en la superficie de la lámina a embutir (rupturas, arrugas, rayados superficiales, etc.). ***Los lubricantes provenientes de los aceites y grasas, son un problema de contaminación ambiental, desde su aplicación hasta su eliminación,*** *ya que estos aceites y grasas requieren del uso de limpiadores alcalinos para su remoción, además de no tener un control adecuado en su disposición. Los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo muestra el desarrollo y la aplicación de recubrimientos base nitruro sobre las herramientas de trabajo (punzón y/o matriz), que se emplean en un proceso de embutido profundo. En este desarrollo se realizaron mediciones de tribología que muestran el potencial que tienen los recubrimientos tipo PVD para el formado de lámina de acero.*

Palabras clave: recubrimientos PVD, embutido profundo, lubricantes, fricción, nitruros.

1. Introducción

Algunos recubrimientos de nitruro de metal, debido a sus características superiores tales como alta dureza y resistencia al desgaste, resistencia a la oxidación, y estabilidad térmica, coeficiente de fricción relativamente bajo y muy buena estabilidad química contra los metales, se han utilizado ampliamente como recubrimientos duros de protección en diversos entornos de trabajo rigurosos, debido a sus propiedades integrales, los recubrimientos que han sido ampliamente utilizados en la industria en los últimos años son; AlTiN, AlCrN y TiAlSiN [1].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los recubrimientos duros de base de nitruro se encuentran en las aplicaciones para condiciones de alta dureza, excelente desgaste y resistencia a la corrosión, debido a esto los recubrimientos permiten mejorar la vida útil de una herramienta en gran medida. La adición de aluminio para formar películas delgadas ternarias, AlTiN y AlCrN son particularmente atractivos y ampliamente utilizadas en herramientas de corte y de formado debido a sus sobresaliente desempeño mecánico [2].

Los Nitruros binarios tales como el c-TiN y el h-Cr2N comprenden la primera generación de recubrimientos de base nitruro, mientras que los recubrimientos ternarios de segunda generación como el c-TiAlN vienen a dar respuesta a la problemática de rendimiento, resistencia al desgaste y a la oxidación en los procesos de manufactura avanzada. Aun así existe la oportunidad de mejorar los procesos de manufactura con estudios e investigaciones con la adición de recubrimientos base nitruros como una nueva generación de nanocompuestos como el TiAlSiN, se logra aumentar la fatiga y la resistencia al impacto [3].

Una de las investigaciones más recientes relacionada con los procesos de estampado realizada en Japón menciona en el artículo “Improvement of formability in Deep drawing of ultra-high strength steel sheets by coating of die” [4], que la aplicación del proceso de embutido en el sector automotriz está aumentando y por ende se requiere mejorar el proceso de transformación de la lámina para disminuir problemas de calidad de la superficie en el producto, estos problemas se incrementan por las condiciones de adelgazamiento de la lámina.

En el artículo publicado por L. Fernández et al. [5] "Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings" se reflejan las necesidades que tiene la industria de la manufactura por desarrollar nuevas alternativas a los lubricantes empleados actualmente en el proceso de embutido, debido a la relación y al nivel de exigencia con la industria alimentaria. Actualmente, aunque existan lubricantes con las especificaciones necesarias para el sector de la alimentación, **surge la necesidad de sustitución completa a causa de los procesos que son necesarios para su remoción y que generan gastos adicionales y problemas de contaminación principalmente de agua.**

El efecto del contenido de Al en TiAlN en recubrimientos ha sido estudiado por diferentes autores, muchos estudios sobre el comportamiento en altas temperaturas y se sabe que el porcentaje de Al en TiAlN influye en la dureza, en la resistencia al desgaste y la vida útil de una herramienta [6].
Sin embargo, el recubrimiento de base nitruro c-AlCrN, con alto porcentaje de aluminio muestra coeficientes de fricción relativamente bajos en comparación con el c-AlTiN lo cual lo hace un candidato de interés cada vez mayor. Este análisis hace presente la importancia para desarrollar investigación de los comportamientos tribológicos en los recubrimientos de c-AlCrN frente a c-TiAlN focalizándose en el/los mecanismo(s) de desgaste y comportamiento de la fricción en este caso en el proceso de embutido. En esta investigación se hace énfasis en los recubrimientos tipo c-TiAlN y c-AlCrN, depositados mediante arco catódico, debido a sus propiedades de dureza y bajos coeficientes de fricción. **Es necesario conocer las propiedades tribológicas y mecánicas de los recubrimientos duros para poder aplicarlos y obtener un mejor desempeño en el proceso.** Algunas propiedades tomadas de la página web de oerlikon balzers coating [7], se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de recubrimientos base nitruro [7].

Recubrimientos	AlTiN	TiCN	AlCrN	TiCrN
Microdureza (HV)	3300	3000	3200	2100
Coeficiente de fricción contra el acero (seco)	0.3	0.4	0.35	0.5
Espesor del recubrimiento (µm)	5	5	5	5
Temperatura máxima de trabajo (°C)	900	400	1100	700

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La propiedad más destacable del AlTiN es su elevada dureza, la cual contribuye a su buena resistencia al desgaste.

Además, exhibe normalmente una buena adherencia a sustratos metálicos y un buen acabado superficial (i.e cantidad de defectos, rugosidad). La presencia de altos porcentajes de aluminio hace al AlTiN más estable térmicamente y más duro, donde la formación de alúmina favorece la disipación de calor, lo que permite la disminución de uso de lubricación.

2. Defectos en un proceso de embutido profundo

En los procesos de estampado, en particular del proceso de embutido, muchos de los defectos de formabilidad del producto están asociados al desgaste del herramental y a las condiciones de fricción y/o lubricación durante el embutido y de la transformación de la lámina. La investigación realizada en el artículo [8] "Lubricant free deep drawing process by macro structured tools" señala que **las condiciones de fricción entre la herramienta y la lámina, son factores que determinan el éxito de la operación de embutido,** generalmente se usan lubricantes líquidos para reducir las fuerzas de fricción durante el proceso. El *coeficiente de fricción* es uno de los tres parámetros más importantes en un proceso de embutido, los otros dos son el radio de la matriz y la fuerza aplicada a la operación, y a la influencia de estos tres parámetros en la optimización del proceso es lo que origina la necesidad de realizar diferentes investigaciones en el diseño de herramentales y desarrollos tecnológicos orientados a la ingeniería de superficies en la actualidad.

En el proceso de embutido profundo existen varios factores de los cuales depende la calidad del producto, como lo son:

- ✓ Diseño del Producto.
- ✓ Diseño de la Herramienta (troquel).
- ✓ Proceso.
- ✓ La fuerza, la energía y la velocidad del proceso de estampado deben ser adecuadas para proporcionar la deformación de la lámina, producir un flujo de metal apropiado y superar la fricción durante el proceso.

Los problemas más comunes en el proceso de embutido profundo son:

a) Arrugas, rayas o marcas superficiales en el producto.
b) Fracturas y micro-fracturas del material.
c) Variaciones dimensionales en el producto.
d) Adelgazamiento del material (lámina).
e) Esfuerzos residuales que provocan cambios en el producto a través del tiempo.
f) Desgaste de la matriz.
g) Fractura de matriz y punzón.

2.1 Condiciones de fricción y lubricación

La fuerza de fricción entre las superficies del punzón y la matriz actuará para resistir el movimiento del material dentro de la matriz durante el proceso de embutido, esta fuerza puede ayudar o perjudicar el proceso de embutido, por lo que tiene que ser controlada y en ocasiones tiene que ser complementada con la regulación de la fuerza de pisado, dependiendo de la forma del producto, por lo que será necesaria menor o mayor fuerza de restricción en cada zona del producto. Por otro lado si el coeficiente de fricción entre las superficies de la pieza de trabajo y del troquel llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La adherencia en el trabajo de metales (también llamada fricción por adherencia) es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfaz herramienta-lámina a embutir en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fuerza de fricción excesiva. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen una reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, también permitirá un flujo de metal más fácil y las distensiones de metal más uniformemente distribuidas, debido a la disminución de la fricción, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final.

Es la matriz, la que está expuesta al movimiento deslizante contra el trabajo de la lámina, y es donde se genera una alta fricción que a su vez conduce a altas temperaturas y la generación de esfuerzos en la lámina. En este fenómeno es donde se concentra la investigación del presente artículo.

3. Diseño del herramental para el proceso de embutido

Antes de iniciar con los cálculos requeridos para el diseño del herramental, se realizará un ensayo mecánico para obtener los valores "r" y "n" que serán importantes para definir si la lámina seleccionada permitirá las deformaciones requeridas durante su proceso de transformación sin sufrir defectos de calidad en el producto final, estos valores también serán importantes para determinar la geometría de los radios del punzón y matriz. Los resultados del ensayo mecánico se muestran en la figura 1 y figura 2.

II. HOJA DE RESULTADOS SECCIÓN RECTANGULAR. *(RESULTS SHEET:RECTANGULAR CROSS SECCTION SPECIMEN)* $A_{ST} = W \times T$ [redacted]

CARACTERÍSTICAS *(CHARACTERISTICS)*					PROBETA 1 *(SPECIMEN 1)*		PROBETA 2 *(SPECIMEN 2)*		PROBETA 3 *(SPECIMEN 3)*	
LONGITUD INICIAL	*(INITIAL LENGTH)*	Lo	mm	(in.)	50.00	(1.97)	50.00	(1.97)	50.00	(1.97)
LONGITUD FINAL	*(FINAL LENGTH)*	Lf	mm	(in.)	68.49	(2.70)	68.50	(2.70)	68.71	(2.71)
ANCHO INICIAL	*(INITIAL WIDTH)*	Wi	mm	(in.)	12.62	(0.50)	12.63	(0.50)	12.62	(0.50)
ESPESOR INICIAL	*(INITIAL THICKNESS)*	Ti	mm	(in.)	1.22	(0.05)	1.22	(0.05)	1.23	(0.05)
AREA INICIAL	*(INITIAL AREA)*	Ast	mm²	(in.²)	15.41	(0.02)	15.41	(0.02)	15.46	(0.02)
CARGA MAXIMA	*(MAX FORCE)*	Fmax	N	Pounds	5651.00	(1270.40)	5646.00	(1269.27)	5651.00	(1270.34)
CARGA CEDENCIA	*(YIELD FORCE)*	Fy	N	Pounds	4215.00	(947.57)	4193.00	(942.62)	4215.00	(947.57)
RESISTENCIA A LA TENSIÓN *(TENSILE STRENGTH)*		σten	MPa	(psi)	366.73	(53190.15)	366.48	(53152.95)	365.54	(53014.04)
ESFUERZO DE CEDENCIA (0,2% offset) *(YIELD STRENGTH)*		σced	MPa	(psi)	273.54	(39673.77)	272.16	(39474.02)	272.65	(39544.23)
ALARGAMIENTO DESPUÉS DE LA FRACTURA *(ELONGATION AFTER FRACTURE)*				(%)	36.98%		37.00%		37.42%	
VALOR "n".					0.1585		0.1609		0.1585	

III. VALORES MEDIOS *(AVERAGE VALUES)*

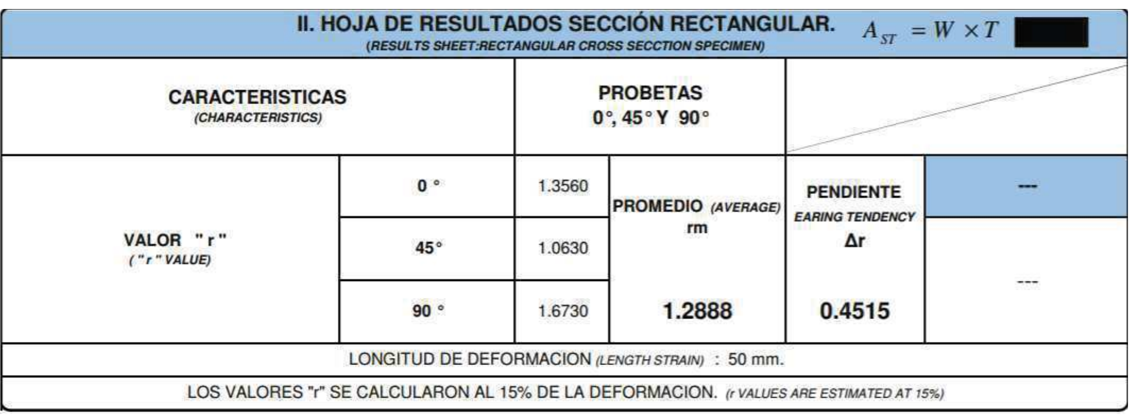
RESISTENCIA A LA TENSIÓN *(TENSILE STRENGTH)*	MPa	(psi)	366.25	(53119.05)
ESFUERZO DE CEDENCIA *(YIELD STRENGTH)*	MPa	(psi)	272.78	(39564.01)
ALARGAMIENTO DESPUÉS DE LA FRACTURA *(ELONGATION AFTER FRACTURE)*	%	(%)	37.13%	
VALOR "n".			0.1593	

Figura 1. Hoja de resultados valor "n"

El valor "n", es el coeficiente de endurecimiento, el cual si el valor "n" es mayor a 0.3 (valor convenido para aceros al carbono), el material tendrá un mayor endurecimiento y permitirá menores deformaciones. De acuerdo al resultado obtenido de la lámina SAE 1018, de 0.1593, está muy por debajo de este límite de 0.3, por tal, la lámina no sufrirá endurecimientos y permitirá deformaciones más grandes durante el proceso de embutido.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 435-450.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





II. HOJA DE RESULTADOS SECCIÓN RECTANGULAR. (RESULTS SHEET:RECTANGULAR CROSS SECCTION SPECIMEN) $A_{ST} = W \times T$ [redacted]					
CARACTERISTICAS (CHARACTERISTICS)		PROBETAS 0°, 45° Y 90°			
VALOR "r" ("r" VALUE)	0 °	1.3560	PROMEDIO (AVERAGE) rm	PENDIENTE EARING TENDENCY Δr	---
	45°	1.0630			---
	90 °	1.6730	1.2888	0.4515	
LONGITUD DE DEFORMACION (LENGTH STRAIN) : 50 mm.					
LOS VALORES "r" SE CALCULARON AL 15% DE LA DEFORMACION. (r VALUES ARE ESTIMATED AT 15%)					

Figura 2. Hoja de resultados valor "r"

El valor "r" es la anisotropía normal del material, el cual si los valores obtenidos son mayores a 1.0, el material tendrá buenas propiedades anisotropicas, ya que permite deformaciones homogéneas en todas las direcciones del rolado, y por lo tanto el proceso de embutido tendrá pocas variaciones de adelgazamiento en los espesores de la lámina. Lo que se traduce en menos defectos de calidad del producto final. El valor "r" en el ensayo mecánico fue de 1.2888.

- A continuación se presentan los cálculos requeridos para el diseño del herramental de acuerdo al diplomado de estampado y troquelado de CIDESI [9].

Calculo de diámetro de silueta de la lámina y punzón.

$$D_B = \sqrt{d^2 + 4dh} \quad \Rightarrow \quad D_B = \sqrt{(62)^2 + 4(62)(30)} \quad \Rightarrow D_B = 106.22 \qquad D_B = 107\ mm \tag{1}$$

Para el diámetro del punzón se considera el mismo diámetro interno del producto a obtener, d =62 mm

Cálculo de radio de punzón y matriz.

La determinación del radio del punzón en esta en función del valor "n" del material, así como de su espesor como lo muestra la tabla 2, el ensayo mecánico a la tensión nos dio como resultado un valor n = 0.1593, debido a que es menor a 0.2, se debe aplicar la formula 10t.

Tabla 2. Relación del radio del punzón para embutido con el valor "n"

Valor n	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
rp	10t	8t	7t	6t	5t	4t

$$rp = 10t \quad \approx \quad rp = 10(1.2) \quad \approx \quad rp = 12\,mm \tag{2}$$

Como mínimo el radio de punzón debe de ser de 12 mm, si es menor existe la posibilidad que se presenten fracturas. Y utilizando este radio, solo es necesario un paso o un golpe de la Prensa en el proceso de embutido. Para la matriz puede ser de 2.5 a 3 veces el espesor del material, en este caso se propone 10 veces el espesor de material para que tenga el mismo radio que el punzón, debido a que no hay ningún inconveniente en la estructura del herramental para el embutido de la pieza, al contrario, al ser el radio más grande favorecerá al flujo del material.

$$rm = 10t \quad \approx rm = 10(1.2) \ \approx rm = 12\,mm \tag{3}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la siguiente figura se representa el proceso de embutido en su proceso intermedio durante el doblado de la lámina.

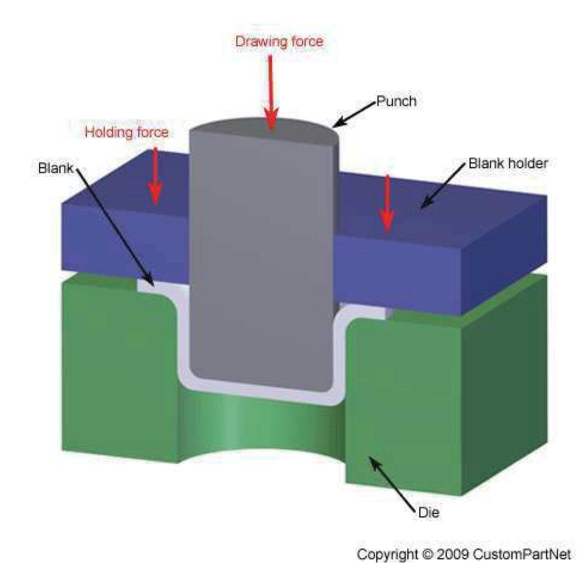


Figura 3. Proceso intermedio del embutido

<u>Cálculo del claro para embutido entre punzón y matriz</u>

$$C = t \times \sqrt{\frac{D_B}{d_p}} \qquad C = 1.2 \times \sqrt{\frac{107}{62}} = 1.57\ mm. \tag{4}$$

El claro de embutido resultó de 1.57 mm, equivale a 1.3 veces el espesor del material, el cual es un claro óptimo para obtener un producto con buena calidad y maximizar la vida útil del herramental. Lo cual se decide mantener el claro calculado.

4. Aplicación de recubrimientos duros AlTiN y AlCrN

Se depositaron películas de recubrimientos duros de c-AlTiN y c-AlCrN aplicando la técnica de arco catódico y se obtuvieron espesores que varían entre 2 y 3 µm. Para los recubrimientos se utilziaron, sustratos planos de acero tipo M2 y D2 que fueron pulidos a espejo previo al proceso de depósito. Se utilizaro 6 muestras de acero M2 con medidas de 2.3 cm de diámetro y 0.5 cm de ancho, con un peso de 20.03 gr. c/u; 2 sustratos para ensayos de tribología con medidas de 5.2 cm de diámetro y 1 cm de ancho, con un peso de 177.09 gr. c/u. La mitad de las muestras se destinaron al recubrimiento c-AlTiN, y el resto al recubrimiento de c-AlCrN. En la figura 4 se muestra un sustrato de acero grado herramienta M2 con rectificado, tal y como se recibieron las muestras para su posterior preparación metalográfica.



Figura 4. Probeta de acero grado herramienta M2.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 435-450.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Quedando identificados los sustratos con las siguientes etiquetas mostradas en la tabla 3:

Tabla 3. Etiquetas de los sustratos de acero M2.

Nombre	Descripción
A-M2-AlTiN-1 (20.03 gr.)	Acero M2 con recubrimiento de nitruro titanio aluminio, sustrato 1, peso 20.03 gr.
A-M2-AlTiN-2 (20.03 gr.)	Acero M2 con recubrimiento de nitruro titanio aluminio, sustrato 2, peso 20.03 gr
A-M2-PE-3 (20.03 gr.)	Acero M2, pulido espejo, sustrato 3, peso 20.03 gr.
A-M2-AlCrN-1 (177.09 gr.)	Acero M2 con recubrimiento de nitruro cromo aluminio, sustrato 1, peso 177.06 gr.
A-M2-AlCrN-4 (20.03 gr.)	Acero M2 sustrato 4, con recubrimiento de nitruro cromo aluminio, peso 20.03 gr.
A-M2-AlCrN-5 (20.03 gr.)	Acero M2 sustrato 5, con recubrimiento de nitruro cromo aluminio, peso 20.03 gr.
A-M2-PE-6 (20.03 gr.)	Acero M2, pulido espejo, sustrato 6, peso de 20.03 gr.
A-M2-AlCrN-2 (177.09 gr.)	Acero M2 con recubrimiento de nitruro cromo aluminio, sustrato 2, peso 177.06 gr.

Se muestran a continuación las piezas (figuras 5 y 6) que conforman el herramental de acero grado herramienta D2, matrices y punzones. Estas piezas fueron manufacturadas en el laboratorio de manufactura de CIDESI, fueron lijadas y pulidas, entregadas con un acabado pulido espejo.



Figura 5. Matriz de 6.2 cm de alto y 9.2 cm de diámetro exterior.



Figura 6. (A) Vista lateral y (B) frontal de punzón de 6.2 cm de alto, 5 cm de diámetro.

A las piezas del herramental del acero D2 se le identificaron con las siguientes etiquetas (tabla 4):

Tabla 4. Etiquetas de piezas del herramental de acero D2

Nombre	Descripción
A-D2-MATRIZ-1	Acero D2 matriz 1
A-D2-MATRIZ-2	Acero D2 matriz 2
A-D2-PUNZÓN-1	Acero D2 punzón 1
A-D2-PUNZÓN-2	Acero D2 punzón 2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4.1 Preparación metalográfica de muestras

Los sustratos de acero fueron preparados metalograficamente, el proceso consistió en un pulido para retirar el rectificado de la muestra. Se emplearon lijas de SiC (carburo de silicio), el pulido de las muestras se realizó con pasta diamante de 3 µm, 1 µm y 0.5 µm, para obtener un acabado a espejo. Posteriormente se realizó limpieza de los sustratos por medio de un equipo de baño ultrasónico de (figura 7). En el interior del equipo se colocó un vaso de precipitados que ya contenía los sustratos de acero sumergidos en alcohol, se programó el equipo para llevar un proceso de duración de 10 minutos, con una potencia del 50 %, y un modo ultrasónico de barrido. Para las mediciones de dureza de los 2 tipos de acero se empleó un micro durómetro (figura 7).



Figura 7. (A) Equipo de limpieza ultrasónico de la marca Elmasonic, (B) Equipo Micro durómetro Wilson Hardness modelo TUKON 1202.

Se realizaron 10 mediciones por cada sustrato y se estimó el promedio para determinar la dureza final, es necesario documentar estos valores para revisar que no haya diferencias significativas que puedan afectar la adherencia en la aplicación de los recubrimientos. Los resultados se expresan en Vickers (HV) en la tabla 5 y en la tabla 6 también se expresan los resultados en Rockwell (HRC):

Tabla 5. Mediciones de dureza HV de sustratos de acero M2.

MEDIDAS DE DUREZA HV 0.5 k			
Muestra	Numero de mediciones	Dureza HV	Promedio
A-M2-PE (20.03 gr.)	1	235	229.06
	2	228	
	3	228.8	
	4	225.1	
	5	215.7	
	6	234.3	
	7	231.1	
	8	228.9	
	9	238.2	
	10	225.5	
		2290.6	
A-M2 PE (177.09 gr.)	1	276.3	253.01
	2	234.2	
	3	276.5	
	4	255.7	
	5	295.5	
	6	253.9	
	7	232.4	
	8	228.3	
	9	238.4	
	10	238.9	
		2530.1	

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 6. Mediciones de dureza HV y HRC de los herramentales (matriz y punzón), acero D2.

MEDIDAS DE DUREZA HV 0.5 k					
Muestra	Numero de mediciones	Dureza HV	Promedio	Conversión a dureza HRC	Promedio
A-D2 PUNZÓN	1	558.3	575.42	54.3	54.02
	2	593.2		54.9	
	3	566.5		53.4	
	4	557.7		52.9	
	5	588.4		54.6	
	6	604.2		55.5	
	7	597		55.1	
	8	574.3		53.8	
	9	561.5		53.1	
	10	553.1		52.6	
		5754.2		540.2	
A-D2 MATRIZ	1	600	608.29	55.3	55.7
	2	599.9		55.3	
	3	613.4		56	
	4	570.5		53.6	
	5	605.7		55.6	
	6	644		57.5	
	7	594.9		55	
	8	635.7		57.1	
	9	595		55	
	10	623.8		56.6	
		6082.9		557	

4.2 Preparación para el depósito de recubrimientos duros

Para el depósito de los recubrimientos c-AlTiN y c-AlCrN se empleó un equipo PVD Metaplas Domino mini (figura 8). Posterior a la limpieza de los sustratos y a la preparación de la cámara de PVD (figura 9), se procedió al montado de los sustratos de acero M2 y D2 sobre los domos que componen el carrusel y realizar la colocación en el interior de la cámara para proceder al depositó del primer recubrimiento de c-AlTiN, se realizó el mismo procedimiento para el segundo depósito del recubrimiento c-AlCrN. Para los depósitos se emplearon blancos de aleaciones metálicas de Al/Ti y Al/Cr para cada recubrimiento respectivamente.



Figura 8. Equipo PVD Metaplas Domino mini de la marca Oerlikon Balzers.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



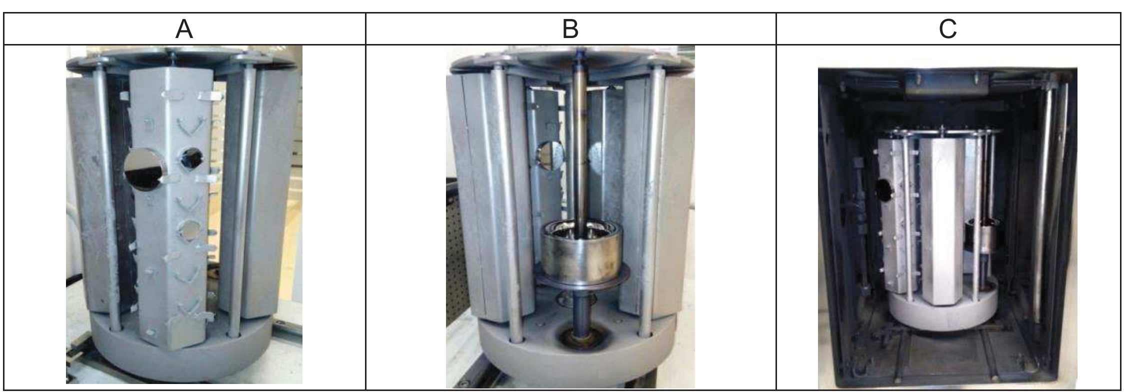


Figura 9. Colocación de sustratos, matriz y carrusel dentro de la cámara de PVD para el depósito de recubrimiento c-AlTiN

El objetivo principal del depósito sobre la matriz consistió en recubrir la parte interna ya que de acuerdo a la problemática que se presenta en el embutido profundo, es ahí donde se genera el mayor coeficiente fricción entre la lámina a embutir y la matriz. Con el fin de cumplir el objetivo, se realizó un análisis observando el interior de la cámara y la posición de los blancos (ingl. Targets), para asegurar el depósito de recubrimiento en una distancia de al menos 2.5 cm dentro de la matriz.

En la figura 10, se muestran los sustratos de acero ya con el recubrimiento de c-AlTiN el cual se identifica por poseer un característico color violeta-gris y en la figura 11 se muestran las muestras de acero M2 con recubrimiento de c-AlTiN.



Figura 10. Carrusel con sustratos de acero M2 y D2 fuera de la cámara PVD con recubrimiento de c-AlTiN.



Figura 11. Sustratos de acero M2 de dos tamaños diferentes con recubrimiento de c-AlTiN.

Los sustratos de acero M2 al ser muestras planas fueron destinadas a la evaluación por SEM, análisis EDS, y ensayos de tribología. A la matriz de acero D2 al poseer una geometría compleja se le realizaron cortes transversales para su caracterización por SEM con el fin de evaluar la homogeneidad del recubrimiento con mediciones de espesor y análisis de composición química por EDS. En las siguientes figuras 12 y 13 se muestran el resultado del segundo depósito del recubrimiento AlCrN.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



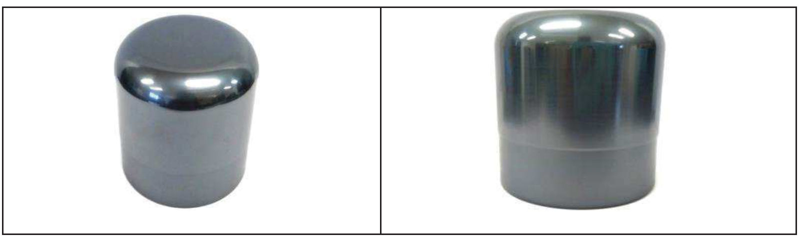


Figura 12. Punzón de acero D2 con recubrimiento de c-AlCrN.



Figura 13. Matriz de acero D2 con recubrimiento de c-AlCrN.

En la figura 14 se muestran diferentes imágenes de la matriz de acero D2 del corte transversal. En la imagen (A) se observa la matriz desde una vista superior, lo que nos permite apreciar un tono más oscuro característico del recubrimiento, al mismo tiempo en la profundidad de la matriz se aprecian diferentes tonalidades de coloración cada vez de un tono más claro, por lo que se puede deducir que hubo variación en el espesor del recubrimiento al interior de la matriz.

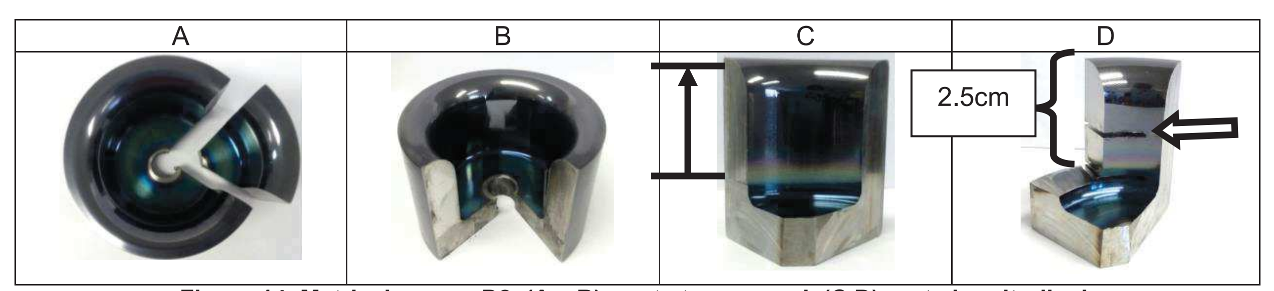


Figura 14. Matriz de acero D2, (A y B), corte transversal, (C,D) corte longitudinal.

En la imagen (B) se observa la matriz desde una vista frontal del corte transversal que se realizó en el laboratorio de manufactura, la imagen (C) muestran la pieza que se extrajo de la matriz, al mismo tiempo se tiene una mejor apreciación del recubrimiento sobre la pieza, se indica con una señalización hasta donde se mantuvo la mejor homogeneidad del recubrimiento de forma cualitativa y que será corroborado cuando se realice caracterización por SEM. En la imagen (D) se muestra una vista frontal de la pieza extraída en donde se observan dos cortes que se realizaron con una cortadora de disco en el laboratorio de metalografía y se indica las longitud de corte a extraer para ser montado en baquelita, 2.5 cm.

4.3 Análisis de tribología

El análisis de tribología se realizó con el objetivo de medir el coeficiente de fricción en el acero con el recubrimiento base nitruro, el cual se debe mantener en un rango similar al coeficiente de fricción de un acero con recubrimiento liquido (lubricado), además de determinar cuál recubrimiento de base nitruro es el que tiene menor coeficiente de fricción. Los parámetros con los cuales se trabajó para llevar a cabo el análisis fueron la carga y la velocidad, estos valores se extrapolaron del proceso de embutido profundo a nivel laboratorio, ya que corresponde a los valores con los cuales se llevará a cabo el proceso de embutido profundo de una lámina de acero AISI 1018 a nivel industrial.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se entiende por tribómetro al equipo mediante el cual es posible determinar la resistencia al desgaste de un material cuando se encuentra en contacto con otro y entre ellos existe movimiento relativo, en un determinado tiempo (figura 15). Mediante un tribómetro es posible llevar a cabo pruebas y simulaciones de fricción, desgaste y lubricación, que son objeto de estudio de desgaste y fricción del par tribológico. Un tribómetro puede medir la fricción sobre una superficie utilizando diferentes métodos, tal es el caso de una esfera deslizante sobre una superficie de referencia (bola sobre disco) que permite obtener un valor relativo de fricción.



Figura 15. Tribómetro Pin-On-Disk ANTON PAAR.

Este equipo es usado para pruebas de desgaste, en ella el perno se coloca perpendicularmente a un disco giratorio como se observa en la figura 16, el esquema de tribómetro perno-disco. El perno se coloca contra el disco a una carga dada por medio de un brazo o palanca, al que se le agrega una determinada carga. Este sencillo método facilita la obtención y el estudio de la fricción y el comportamiento de desgaste en casi todas las combinaciones de material en estado sólido, con variables en el tiempo, la presión de contacto, la velocidad, la temperatura, la humedad, la lubricación, entre otras.

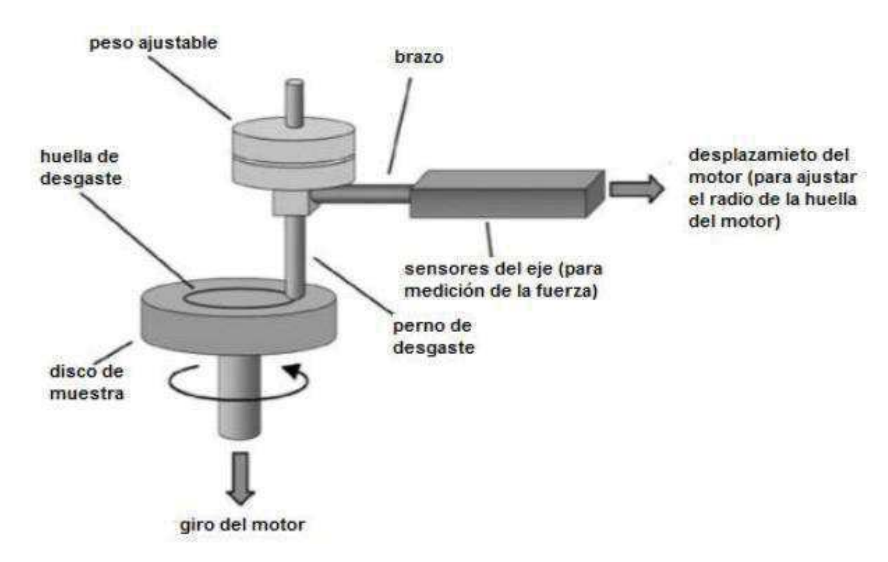


Figura 16. Esquema de funcionamiento de Tribómetro (Perno contra disco)

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 435-450.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



5. Resultados

Se evaluó el coeficiente de fricción sobre el sustrato de material M2, sin recubrimiento y sobre los sustratos con recubrimiento c-AlTiN y c-AlCrN, el valor de los parámetros con los cuales se llevó acabo la tribología se extrapolaron a nivel laboratorio del proceso de embutido profundo con el fin de realizar un análisis semejante (tabla 7), de los cuales la carga y la velocidad son valores que se extrapolaron a nivel laboratorio, ya que fueron tomados como referencia del proceso de embutido profundo al que estará sometido la lámina de acero AISI 1018 a nivel macro en el sistema industrial.

Tabla 7. Parámetros de trabajo del análisis de tribología.

PARAMETROS					
Radio	**Ciclos**	**Carga**	**Substrato**	**Dimension**	**Velocidad lineal**
5 mm	5000	5 N	Acero cromado 52100	6 mm	10.4301 cm/s
9mm	20000	5 N	Acero cromado 52100	6 mm	18.8496 cm/s

La figura 17 muestra las imagenes de las muestras con las pistas de desgaste, la imagen A corresponde a la pista de radio 5 mm con 5000 ciclos y la imagen B al radio de 9 mm con 20000 ciclos, la imagen C corresponde a las pistas del sustrato de acero M2 sin recubrimiento y por ultimo la imagen C es el sustrato con recubrimiento AlCrN ambos sustratos con radios de 5 y 9 mm.

A	B	C	D

Figura 17. (A) Muestra con recubrimiento de c-AlTiN Radio 5 mm y (B) Radio 9mm. (C) Muestra de acero M2 sin recubrimiento y (D) Muestra con recubrimiento c-AlCrN.

A continuación se presentan los coeficientes de fricción que se obtuvieron de las pistas de desgaste (figura 18 y 19), realizandose el comparativo de los coeficientes de fricción de las muestras con recubrimientos c-AlTiN, c-AlCrN y el sustrato sin recubrimiento ambos con radio de 5mm y 5000 ciclos.

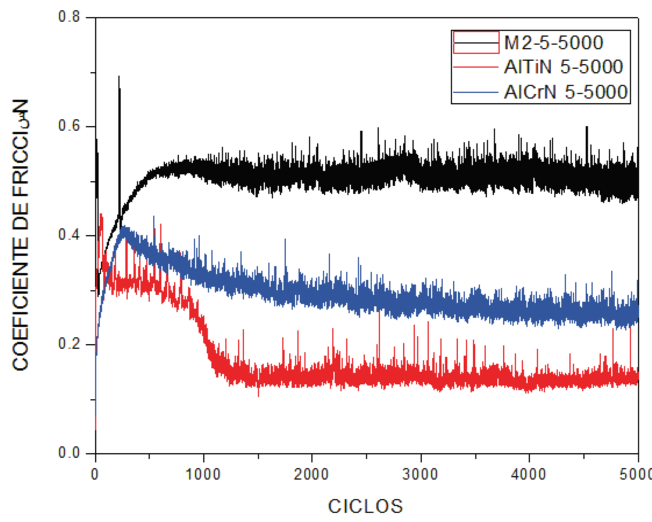


Figura 18. Gráfica de coeficentes de fricción de acero M2, c-AlTiN y c-AlCrN radio 5mm, 5000 ciclos

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 34, pp. 435-450.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



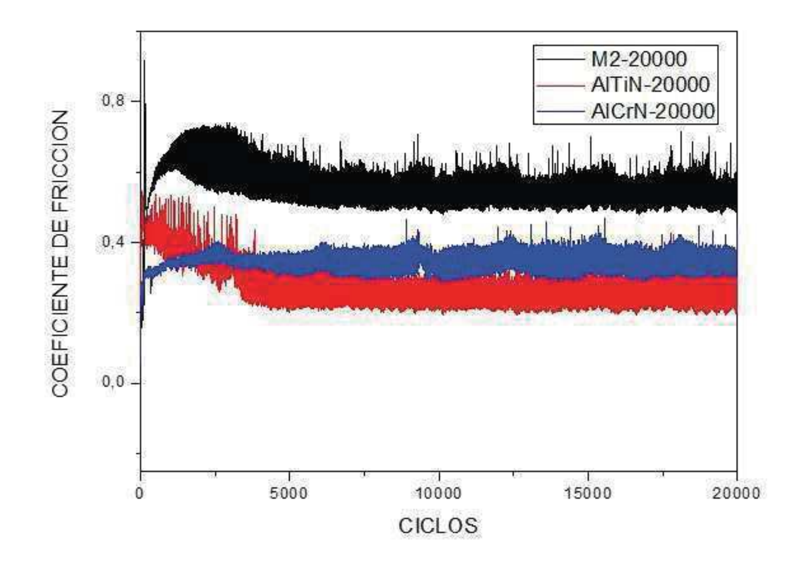
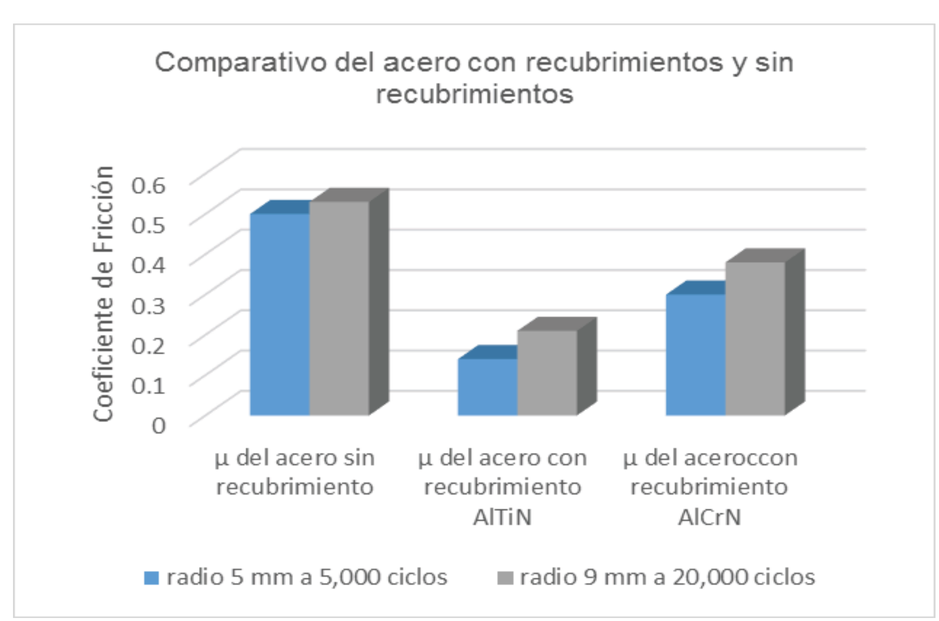


Figura 19. Gráfica de coeficentes de fricción de acero, c-AlTiN y c-AlCrN radio 9mm, 20000 ciclos.

Se presentan el resumen de resultados en la tabla 8, ademas de una gráfica estadística de los resultados (figura 20).

Tabla 8. Resultados de coeficiente de fricción

	radio 5 mm a 5,000 ciclos	radio 9 mm a 20,000 ciclos
μ del acero sin recubrimiento	0.5	0.53
μ del acero con recubrimiento AlTiN	0.14	0.21
μ del aceroccon recubrimiento AlCrN	0.3	0.38



El coeficiente de fricción se reduce un ***72% al aplicar c-AlTiN***

Figura 20. Comparativo de los valores de coeficiente de fricción.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



6. Conclusiones

En el estudio de tribologia realizado de manera extrapolar a un proceso de embutido, podemos confirmar que es posible reducir el 72% de desgaste atribuido al coeficente de friccion en un acero con la aplicación de un recubrimiento base nitruro. Se logró un coeficiente de fricción de μ=0.14 y de μ=0.21, en comparación con los valores de μ=0.50 y de μ=0.53 que se obtuvieron del acero sin el uso de recubrimientos.

Los mejores resultados con el menor coeficiente de fricción se obtuvieron con la aplicación del recubrimiento AlTiN y de acuerdo a las pruebas realizadas, podemos concluir que las nuevas tecnologias y nuevos productos en los procesos de manufactura avanzada complementan a los procesos de manufactura convencional, en el presente artículo se presenta la aplicación de recubrimientos como propuesta para la sustitucion de lubricantes liquidos y como una alternativa para mejorar la problemática de la calidad, durabilidad, y la resistencia de materiales, así como disminuir costos y disminuir emisiones contaminantes, y efectivamente los recubrimientos vienen a dar respuesta a esta problemática en el proceso de embutido profundo.

En esta investigación se pudo confirmar que la aplicación de recubrimientos puede aportar a la sustitución de los agentes lubricantes líquidos, considerando que sólo se extrapolaron las condiciones del proceso de embutido y se evaluó el coeficiente de fricción del par tribologico en condiciones ideales. Los resultados muestran que los recubrimientos duros se pueden usar con éxito en aplicaciones de formado de lámina, se reduce la fricción y el desgaste. Sin embargo, la preparación del material y las técnicas de deposición para lograr un recubrimiento con buena adhesión son cruciales y de alto costo de inversión inicial, por lo cual la lubricación con líquidos aplicada a procesos de formado de metales sigue siendo requerido para la industria. Es necesiario una siguiente etapa de estudio ya en un proceso de embutido de manera industrial con la infraestructura de una Prensa y sus herramentales para el formado de lámina, con la adición de recubrimientos de base nitruros como una nueva generación de sistemas bien establecidos para la protección al desgaste de herramentales en un proceso de formado.

La meta es desarrollar nuevas alternativas a los lubricantes empleados actualmente en el proceso de embutido, debido al nivel de exigencia con la industria, se requiere de más investigaciones y desarrollos tecnológicos en ingeniería de superficies para lograr el objetivo de eliminar el uso de lubricantes en los procesos de estampado, ya que es una forma importante de mejora y posibilidad de optimizar recursos en la industria actual.

Agradecimientos:

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Manufactura Aditiva (LISMA) que forma parte del Laboratorio nacional CENAPROT en su sede CIDESI así como el apoyo otorgado por el Conacyt através del Proyecto del Fondo de Fronteras de la Ciencia # 2015-02-1077, "ESTUDIO Y ENTENDIMIENTO DE LA DEGRADACIÓN Y ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE RECUBRIMIENTOS DUROS LUBRICANTES PARA APLICACIONES DE MEDIANA Y ALTA TEMPERATURA".

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Referencias

[1] Zhang, L., Chen, Y., Feng, Y., Chen, S., Wan, Q., & Zhu, J.
Electrochemical characterization of AlTiN, AlCrN and AlCrSiWN coatings
Vol. 53, November 2015

[2] Liu Aihua, Deng Jianxin, Cui Haibing, Chen Yangyang, Zhao Jun
Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings
Vol. 31, September 2011

[3] Sai Pramod Pemmasania, Krishna Valletia, Ravi C. Gundakarama, Koteswararao V.
Effect of microstructure and phase constitution on mechanical properties of Ti1xAlxN coatings.
Vol. 313, Jun 2014

[4] Y. Abe, T. Ohmi, K. Mori, T. Masuda
Improvement of formability in deep drawing of ultra-high strengthsteel sheets by coating of die.
Vol. 214, March 2014

[5] L. Fernandes, F.J.G. Silva, M.F. Andrade, R. Alexandre, A.P.M. Baptistad, C. Rodrigues
Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings
Vol. 325, Jun 2017

[6] J.L. Mo, M.H. Zhu, B. Leia, Y.X. Leng, N. Huang
Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings—Deposited by physical vapor deposition.
Vol. 263, March 2007

[7] www.oerlikonblazerscoating.com/bmx/spa/01-products-services.php

[8] A.Brosius, A.Mousavi
Lubricant free deep drawing process by macro structured tools
Vol. 65, February 2016

[9] Autor: CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL (CIDESI)
Estudio de Materiales (valores n y r)
Diplomado en estampado y troquelado (2013)

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 451-460.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño y Construcción de un Dedo Pulgar Robótico Multi-articulado

Reyes Rivas Alonso y Morales Sánchez Eduardo

Instituto Politécnico Nacional. CICATA-IPN Unidad Querétaro
Cerro Blanco No. 141, Qro, Qro. Mex. CP 76090

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y la construcción en impresión 3D de un dedo pulgar robótico multiarticulado que desarrolla el movimiento de flexión extensión con un solo grado de libertad. Para lograr esta meta se llevó a cabo la siguiente metodología: Se determinaron las características antropométricas y antropomórficas del dedo pulgar de la mano humana a partir de la revisión bibliográfica; a continuación se realizó una propuesta de diseño basado en un mecanismo de 4 barras con una transmisión tuerca tornillo como único grado de libertad; la falange distal, la falange proximal y el metacarpo corresponde a las barras del mecanismo formando el dedo pulgar con una característica antropomórfica; Se procedió a realizar una simulación de movimiento con apoyo del software de diseño CAD para identificar los problemas de movilidad y dimensionamiento; Se procedió a la construcción del dedo diseñado utilizando impresión 3D; Se ensambló y se comprobó la trayectoria del dedo multiarticulado. Se concluye que el dedo pulgar robótico multiarticulado propuesto tiene flexión y extensión con un grado de libertad, que tiene un dimensionamiento antropométrico y una apariencia más antropomórfica por lo cual puede ser utilizado para una mano robótica.

Palabras clave: dedo robótico; multiarticulado, antropométrico.

1. Introducción

La mano humana es capaz de sujetar y manipular objetos con formas y tamaños diferentes, esto debido a que cuenta con más de 20 grados de libertad, 14 falanges 5 metacarpianos, 8 carpianos en la muñeca, músculos y tendones que proporcionan a la estructura ósea de la mano, la posibilidad de ejecutar movimientos de fuerza y precisión de forma estable y con una gran destreza. Con el objetivo de realizar tareas más precisas y con una mayor destreza, se han ido incorporando manos robóticas como efector final de manipuladores robóticos dentro de los procesos industriales, las cuales cuentan con múltiples dedos, cada uno con un número determinado de articulaciones, tratando de emular las funciones de la mano [1].

Como es de saberse una mano robótica, contiene una gran cantidad de grados de libertad, ocasionando dificultades en cuanto a restricciones de peso y estrategias de control, por lo que diferentes investigadores, han propuesto mecanismos capaces de mantener una alta destreza sin incrementar la complejidad de los sistemas de control y reduciendo el número de articulaciones activas, sustituyéndolas por mecanismos acoplados que realicen tareas similares. Minimizar el número de actuadores activos es una de las estrategias a seguir, diseñar las falanges de la mano (dedos) con mecanismos de eslabones acoplados [2], es una propuesta que ha sido llevada a la practica en diversos modelos, propuestos con anterioridad, obteniendo buenos resultados en cuanto a la trasmisión de fuerza, así como en la generación de la trayectoria deseada. Generalmente la mano robótica desarrolladas con mecanismos multiarticulados no presentan un aspecto antropomórfico por lo que el objetivo.

El presente trabajo se hizo la recolección de información en distintas bibliografías referente al dimensionamiento promedio de las partes que componen la mano humana, esta información se utilizo como datos iniciales para el acondicionamiento del mecanismo de 4 barras utilizado para la

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 451-460.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



realización del movimiento de flexo extensión del dedo pulgar robótico propuesto, dicha información sirvió también como base para el diseño de la apariencia más antropomórfica que se logró obtener.

2. Marco teórico:

2.1. La mano Humana

La mano es el órgano terminal de la extremidad superior, que en el ser humano es una de las partes más importantes del cuerpo, por su riqueza funcional, brinda la posibilidad de ser un segmento efector, sensitivo, permite realizar múltiples movimientos y acciones necesarias para la supervivencia y relación con el medio ambiente.

La mano humana se compone de 27 huesos divididos en tres grupos: el carpo, los metacarpianos y las falanges, se conecta a la muñeca a través de la palma y está dotada de veinte GDL (grados de libertad) accionados por cerca de cuarenta músculos [3], La estructura ósea de la mano se muestra en la figura 1.

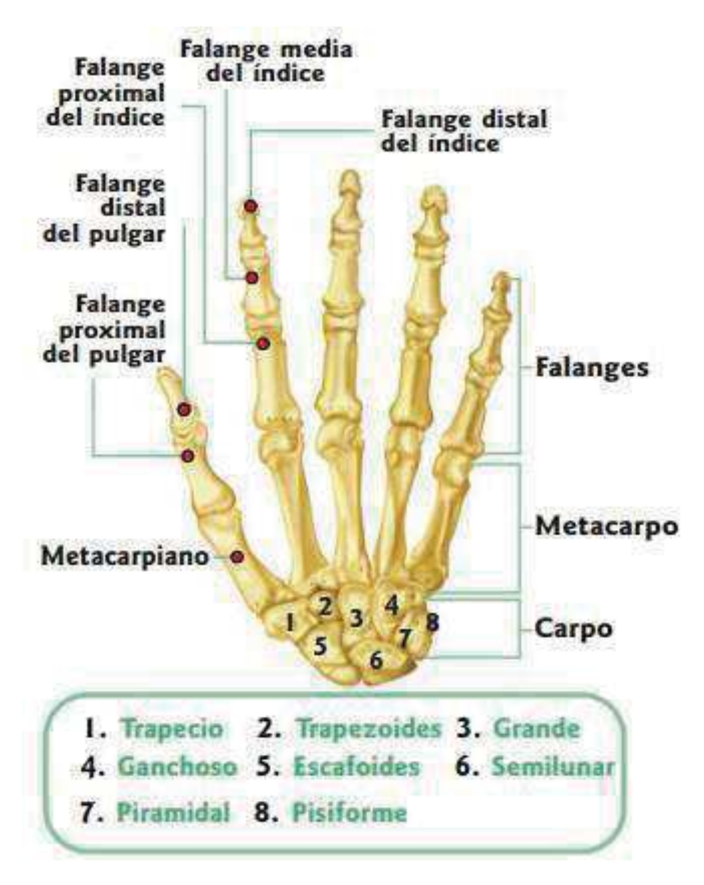


Figura 1 Estructura ósea de la mano.

Cada dedo está compuesto por tres falanges (Distal, Intermedia y proximal), a excepción del dedo pulgar que solo tiene dos (Distal y Proximal). El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación, debido a la gran movilidad de su metacarpo. Esto permite variar la orientación en que se desarrolla el movimiento de doblado y extensión del dedo pulgar, propiedad a través de la cual es posible oponer el dedo pulgar a los otros dedos. El dedo pulgar es el agente de la pinza pulgar-dedos, sin él, los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en vez de movimientos precisos. El dedo pulgar puede realizar los siguientes movimientos [3]:

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 451-460.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



- Abducción-extensión (figura 2ª) que separa el dedo pulgar del eje de la mano, su amplitud es de 35 a 40°, este movimiento abre la mano.
- La aducción (figura 2b) que aproxima el dedo pulgar al eje de la mano. Su amplitud es de 35 a 40°.
- La oposición (figura 2c) que combinada con la flexión dedo meñique. Se trata de un movimiento de prensión o cierre de la mano y presenta una amplitud de 45 a 60°.

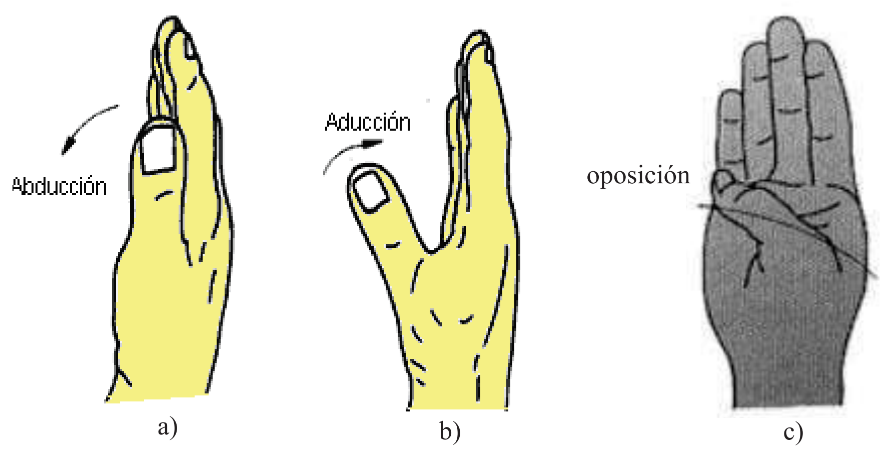


Figura 2 Movimientos del dedo pulgar, (a) abducción, (b) aducción, (c) oposición

3. Rango de Movilidad de los Dedos.

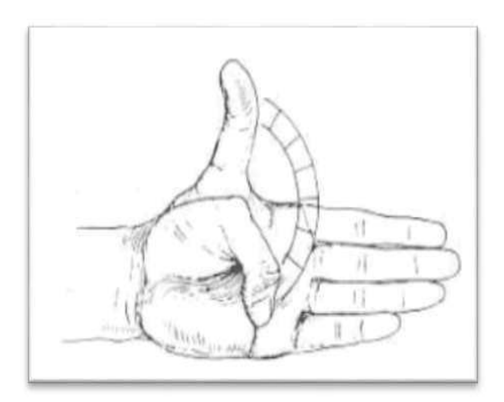
El movimiento de los dedos se mide en términos del grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión, es importante observar que la hiperextensión esta medida con un ángulo negativo, por lo tanto, el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión.

3.1. Flexión y Extensión del Pulgar.

La flexión y extensión del pulgar es más fácil de identificar cuando se intenta tocar la base del dedo menique, con este movimiento de abducción tras-palmar se observa la flexión activa de las articulaciones metacarpo-falángica e inter-falángica del pulgar como se muestra en la figura 3. La flexión y extensión de la articulación MCF del pulgar presenta un arco de movilidad de aproximadamente 50° entre este dedo y el Índice, mientras que la articulación interfalángica de 90° y -20° con respecto a la línea axial del dedo pulgar, como se muestra en las figuras 3a,3b,3c. [5]

ISBN: 978-607-9394-14-1.







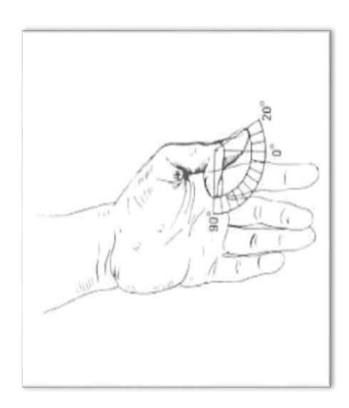


Figura 3. a) Abducción Tras-palmar del Pulgar; b) Flexión y Extensión del Pulgar: Articulación Metacarpo falángica. c) Flexión y Extensión del Pulgar: Articulación Interfalángica.

4. Síntesis y análisis del pulgar

4.1. Rango de movimiento y simplificación.

Como se menciona en Konstantinos [6] hasta un 76% del rango de movimiento disponible (RdM) del pulgar humano no es utilizado cuando se realizan actividades simples. El pulgar humano ha sido estudiado y descrito en una variedad de modelos cinemáticos [6], [7], [8], donde la clasificación de cada articulación, el número de grados de libertad de la misma, así como la ubicación de los elementos de rotación han sido descritos.

Comúnmente las manos robóticas poseen un número de grados de libertad reducidos o juntas y ejes que no corresponden a su contraparte humana. Aun que diversos investigadores han desarrollado distintas variantes de manos bio-inspiradas, aun no existe una mano robótica que emplee un pulgar capaz de realizar movimiento de aducción/abducción que tengan una trayectoria similar a la del pulgar humano, una consideración adicional para la movilidad del pulgar y su diseño es la rotación relativa con respecto a la palma de este y el movimiento de flexión/extensión de sus falanges proximal y distal [10].

4.2. Mecanismos planos

Un mecanismo plano es aquel en el que todas las partículas describen curvas planas en el espacio y todas estas se encuentran en planos paralelos; en otras palabras, los lugares geométricos de todos los puntos son curvas planas paralelas a un solo plano común. Esta característica hace que el lugar geométrico de cualquier punto de un mecanismo plano se represente con su verdadero tamaño y forma real, en un solo dibujo o una sola figura. La transformación del movimiento de cualquier mecanismo de esta índole se llama coplanaria. El eslabonamiento plano de cuatro barras, la leva de placa y seguidor y el mecanismo de corredera manivela, son ejemplos de mecanismos planos.

Una de las principales preocupaciones, ya sea en el diseño o en el análisis de un mecanismo, es el número de grados de libertad, conocido también como movilidad del dispositivo. La movilidad de un mecanismo es el número de parámetros de entrada (por lo general variables de par) que se deben controlar independientemente, con la finalidad de llevar al dispositivo a una posición en particular. Para desarrollar esta relación, es necesario considerar que antes de conectarse entre sí, cada eslabón de un mecanismo plano posee tres grados de libertad cuando se mueve en relación al eslabón fijo. Por consiguiente, sin contar este último, un mecanismo plano de n eslabones posee $3(n - 1)$ grados de libertad antes de conectar cualquiera de las articulaciones. Al conectar una articulación con un grado de libertad, por ejemplo, un par de revolución, se tiene el efecto de proveer dos restricciones entre los eslabones conectados. Si se conecta un par con dos grados de libertad, se proporciona solo una restricción. Cuando las restricciones de todas las articulaciones se restan del total de grados de libertad de los eslabones no conectados, se encuentra la movilidad resultante del mecanismo

ISBN: 978-607-9394-14-1.



conectado. Cuando se usa j_1 para denotar el número de pares de un solo grado de libertad y j_2 para el número de pares con dos grados de libertad, la movilidad resultante m de un mecanismo plano de n eslabones está dada por: [1]

$$m = 3(n-1) - 2j_1 - j_2 \tag{1}$$

4.3 Ley de Grashof.

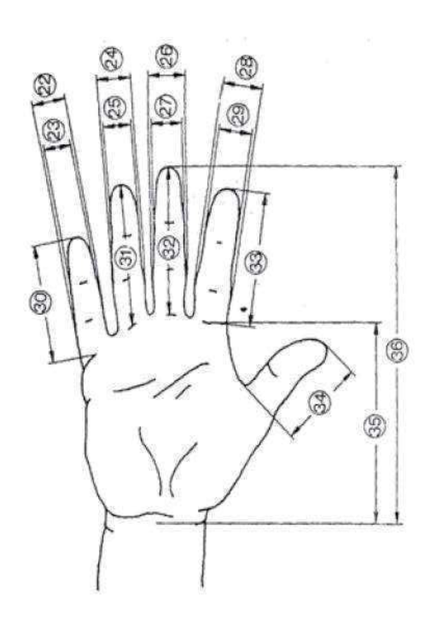
Evidentemente, una de las consideraciones de mayor importancia cuando se diseña un mecanismo que se impulsara con un motor, es asegurarse de que la manivela de entrada pueda realizar una revolución completa. Los mecanismos en que ningún eslabón describe una revolución completa no serían útiles para estas aplicaciones. La ley de Grashof afirma que, para un eslabonamiento plano de cuatro barras, la suma de las longitudes más corta y más larga de los eslabones no puede ser mayor que la suma de las longitudes de los dos eslabones restantes, si se desea que exista una rotación relativa continua entre dos elementos. Como se muestra en la formula (2), en donde el eslabón más largo tiene la longitud l, la del más corto es s y los otros dos tienen las longitudes p y q. Siguiendo esta notación, la ley de Grashof especifica que uno de los eslabones, en particular el más pequeño, gira continuamente en relación con los otros tres sólo cuando: [1]

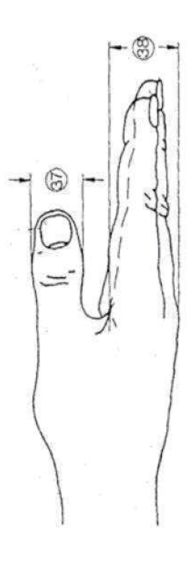
$$S + l \leq p + q \tag{2}$$

Si no se satisface esta desigualdad, ningún eslabón efectuará una revolución completa en relación con el otro.

5. Metodología

Para comenzar con el diseño de la estructura mecánica del dedo pulgar se toma en consideración la antropometría física de la mano humana de un hombre adulto promedio. El diseño actual del dedo pulgar robótico se basa en la Norma DIN 33 402-2, que especifica medidas estándar del cuerpo humano, según Melo, [11] son utilizadas en el diseño de herramientas, utillajes y mandos, con el fin de lograr un prototipo estético y funcional en relación a una mano real.
La Figura 4a y 4b muestran las medidas antropométricas de la mano según la Norma DIN 33 402-2 y la Tabla 1 expresa en percentiles los valores correspondientes.





Robótica y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 451-460.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 4 Medidas Antropométricas de la Mano según Norma DIN 33 402-2

6. DISEÑO Y SELECCIÓN

El diseño mecánico del dedo pulgar robótico se realiza con el software de diseño asistido por computador SolidWorks®, éste permite crear modelos 3D de una manera rápida, productiva y reduciendo los costes de operación, generando así soluciones en el desarrollo de productos.

El diseño inicial toma como base los valores obtenidos en la Norma DIN 33 402-2 la cual establece el dimensionamiento promedio de las partes del cuerpo humano esto en conjunto con los rangos de movilidad angular mencionados anteriormente [5] en un mecanismo de 4 barras como se muestra en la figura 5. Las dimensiones de cada eslabón se muestran en la tabla 3.

Tabla 1. Medidas Antropométricas de la Mano según Norma DIN 33 402-

	Percentiles		
	5%	50%	95%
22. ANCHO DEL MEÑIQUE EN LA PALMA DE LA MANO	1,8	1,7	1,8
23. ANCHO DEL MEÑIQUE PRÓXIMO DE LA YEMA	1,4	1,5	1,7
24. ANCHO DEL DEDO ANULAR EN LA PALMA DE LA MANO	1,8	2,0	2,1
25. ANCHO DEL DEDO ANULAR PRÓXIMO A LA YEMA	1,5	1,7	1,9
26. ANCHO DEL DEDO MAYOR EN LA PALMA DE LA MANO	1,9	2,1	2,3
27. ANCHO DEL DEDO MAYOR PRÓXIMO A LA YEMA	1,7	1,8	2,0
28. ANCHO DEL DEDO ÍNDICE EN LA PALMA DE LA MANO	1,9	2,1	2,3
29. ANCHO DEL DEDO ÍNDICE PRÓXIMO A LA YEMA	1,7	1,8	2,0
30. LARGO DEL DEDO MEÑIQUE	5,6	6,2	7,0
31. LARGO DEL DEDO ANULAR	7,0	7,7	8,6
32. LARGO DEL DEDO MAYOR	7,5	8,3	9,2
33. LARGO DEL DEDO ÍNDICE	6,8	7,5	8,3
34. LARGO DEL DEDO PULGAR	6,0	6,7	7,6
35. LARGO DE LA PALMA DE LA MANO	10,1	10,9	11,7
36. LARGO TOTAL DE LA MANO	17,0	18,6	20,1
	5%	50%	95%
37. ANCHO DEL DEDO PULGAR	2,0	2,3	2,5
38. GROSOR DE LA MANO	2,4	2,8	3,2

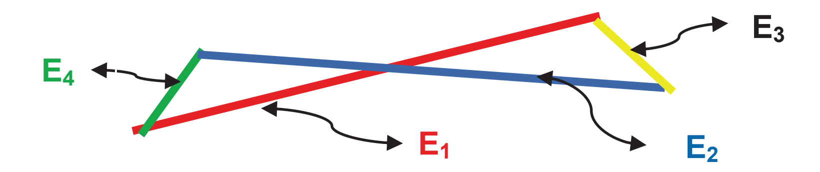


Figura 5. Representación del mecanismo de 4 barras del dedo pulgar.

Tabla 3. Dimensiones de eslabones del mecanismo de 4 barras para dedo pulgar

Eslabones	Medidas en mm.
E_1	43
E_2	42.2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



E_3	6
E_4	6

7. Resultados

Con base en las medidas establecidas para el mecanismo de cuatro barras se genero el diseño de los componentes del dedo pulgar los cuales son: falange distal (este conforma el eslabón $\mathbf{E_4}$ del mecanismo de cuatro barras que va desde el punto de giro central hasta un punto de tracción en su parte inferior), falange proximal (representa el eslabón $\mathbf{E_2}$), metacarpo (corresponde al eslabón $\mathbf{E_3}$) y un último eslabón que conecta la falange distal con el metacarpo (eslabón $\mathbf{E_1}$) generando así el mecanismo de 4 barras. Figura 6.

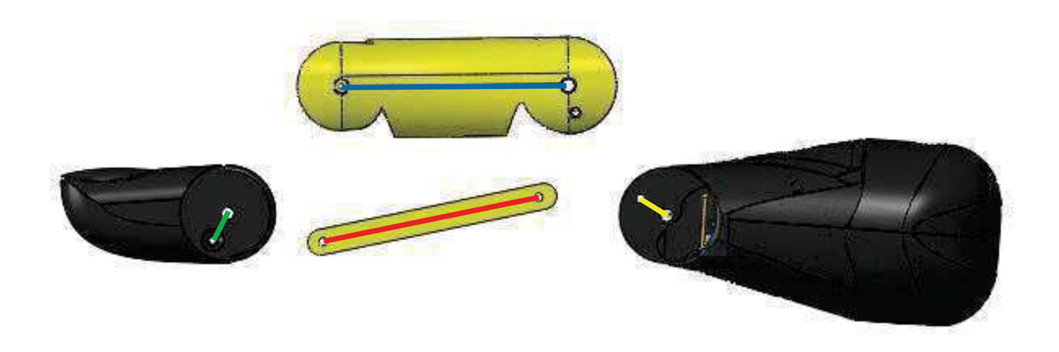


Figura 6. Vista Explosionada de los elementos del dedo pulgar que conforman el mecanismo de 4 barras

La figura 7 muestra el ensamble del mecanismo de 4 barras que genera al dedo pulgar. Observe el mecanismo de 4 barras con la forma correspondiente de cada barra que da forma al dedo pulgar.

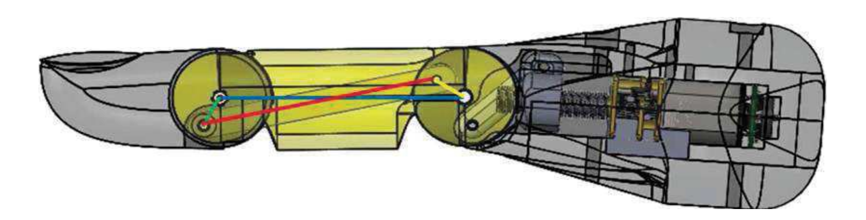
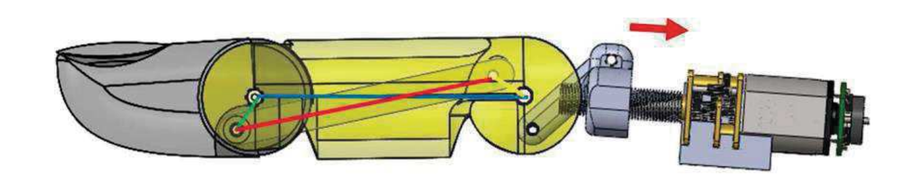


Figura 10. Ensamble de los elementos que conforman el dedo pulgar con representación del mecanismo de 4 barras.

Como se mencionó anteriormente el dedo pulgar debe realizar el movimiento de flexión – extensión con un solo grado de libertad. Esto se logra por medio de una transmisión tuerca tornillo acoplado al eslabón E3 o metacarpo como se muestra en la figura 11. El diseño incorpora al actuador físicamente dentro del metacarpo del dedo pulgar.



Robótica y Mecatrónica, Capítulo 35, pp. 451-460.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 11. Representación del mecanismo de trasmisión tuerca tornillo integrado dentro del cuerpo del metacarpo.

7.1 Comprobación de movilidad de flexo extensión.

A continuación, en la figura 12 se muestra en una secuencia de tres imágenes el recorrido que realiza el dedo pulgar robótico realizando el movimiento de flexo extensión cubriendo el movimiento angular posible analizando con anterioridad.

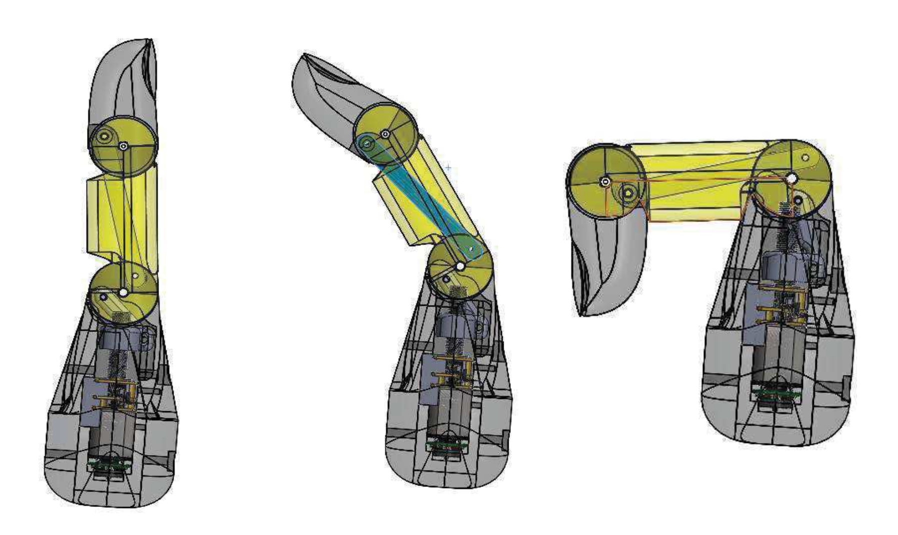


Figura 12. Flexo extensión del dedo pulgar diseñado.

7.2. Diseño final del dedo pulgar multiarticulado

La figura 13 muestra el diseño isométrico del dedo pulgar antromórfico y antropométrico diseñado en base a un mecanismo 4 barras para realizar el movimiento de flexo extensión. Obsérvese que el dedo pulgar tiene una forma anatómicamente humana es decir antromórfica. A continuación, con los dibujos correspondientes se procedió a construir en impresión 3D el dedo pulgar.



Figura 13. Isométrico solido del dedo pulgar robótico multiarticulado antropométrica y antropomórfico

ISBN: 978-607-9394-14-1.



7.3. Construcción del dedo pulgar por impresión 3D

A partir del diseño CAD que se obtuvieron los archivos. slt para imprimir en 3D. Se imprimió en material PLA. La figura 14 muestra el dedo pulgar construido en PLA. Se muestra el movimiento de flexo extensión del dedo demostrando que el dedo es capaz de realizar el movimiento de flexo extensión como de acuerdo al objetivo principal del proyecto.
Como trabajo a futuro, el dedo pulgar construido servirá para construir una mano robótica multi articulada basada en mecanismos 4 barras.



Figura 14. Dedo pulgar robótico multi-articulado antropométrico y antropomórfico construido en material PLA mostrando el movimiento de flexo extensión.

En la figura 15 se muestra la incorporación del actuador dentro de la estructura del metacarpo el cual le proporciona al mecanismo el movimiento de flexo extensión por medio de la trasmisión tuerca tornillo. El posicionamiento de dicho actuador permite la incorporación de un actuador más y un base de giro las cuales en un trabajo futuro servirán para proporcionarle al dedo pulgar robótico propuesta la movilidad de abducción- aducción y rotación.

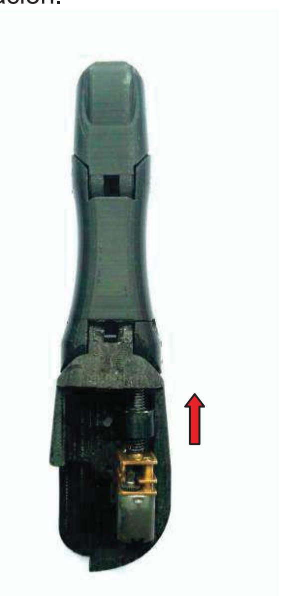


Figura 15. Posicionamiento del actuador dentro de la estructura del metacarpo del dedo pulgar robótico

ISBN: 978-607-9394-14-1.



8. Conclusión

Se concluye que es posible diseñar y construir un dedo pulgar con características antropométricas y antropomórficas que realiza el movimiento de flexo extensión por medio de un mecanismo de 4 barras.
La impresión 3D (manufactura aditiva) permite que el proceso de diseño y construcción sea muy rápido y que se puedan realizar las mejoras al diseño en tiempos muy cortos logrando un producto de buena calidad y desempeño.
El dedo pulgar construid formará parte de una mano robótica que tendrá también las características de antropométrica y antropomórfica.

9. Referencias

[1]. Velázquez A. T. "Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multi-articulada", Tesis doctoral Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrados e Investigación. México, D.F 2007.

[2]. Feix T. Bullock I.M. Dollar A.M. "Analysis of human grasping behavior: object characteristic and grasp type", IEEE transactions on haptics, vol. 7, no. 3, July-September 2014.

[3]. Taylor G.L. Schwartz R.J. "The Anatomy and Mechanics of the Human Hand", Artificial Limbs, Vol.2, pp.22-35, 1955.

[4]. Rouviere H. Delmas A. "Anatomía Humana descriptiva, topográfica y funcional", ¨Fixed and moving Polodes for a New Articulated Finger Mechanism¨, 6th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Danube Region RAAD97 pp. 319-324.

[5]. García F. Martínez J. Saltaren R., Guerrero A. López J. "Diseño mecatrónico de un dedo antropomorfo Parte I: Mecánica", Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Cartagena, 2001.

[6]. Dermitzakis K. Ioannides A. Lin H.T. "Robotic Thumb Grasp-Based Range of Motion Optimization" Conferencia, 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS. - Osaka, Japan: IEEE, pages. 3163-3166 2013.

[7]. Bunnell S. "Opposition of the thumb" Publication periodical Journal of Bone and Joint Surgery. - pages. Volume 20, 269–284 1938.

[8]. Valero-Cuevas F.J. Johansonc M.E. Towlesc J.D. "Towards a realistic biomechanical model of the thumb" Publication periodical Journal of Biomechanics. - pages. 1019–. 2003.

[9]. Napier J. R. "The Prehensile Movements of the Human Hand", The Journal of bone and Joint surgery, British volume, November 1956

[10]. Chalon M. Grebenstein M. Wimböck T. Hirzinger G. "The thumb: Guidelines for a robotic design" Conferencia the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan: IEEE, pages. 5886-5904. 2010.

[11]. Melo J. L. "Ergonomía Practica, Guía para la evaluación ergonómica de un puesto de trabajo", Fundación MAPFRE, Impreso en Argentina, Primera Edición, 2009.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 461-470.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Detección de *Salmonella Typhimurium* en Tomate Utilizando Imágenes Hiperespectrales

Grajeda González Uziel Francisco[1], Luna Maldonado Alejandro Isabel[1], Contreras Salazar Ernesto Alonso[2], Vidales Contreras Juan Antonio[1] y Rodríguez Fuentes Humberto[1]

[1]Ingenieria en Alimentos, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, General Escobedo, Nuevo León.
[2]Departamento de Ingeniería en Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán de Rosales, Sinaloa.

Resumen

Salmonella es una bacteria asociada a brotes de enfermedades. A nivel mundial, la detección de esta bacteria es a través de medios selectivos y reacción en cadena de polimerasa (PCR). Es bien conocido que tanto PCR y medios selectivos de cultivo consumen bastante tiempo (usualmente entre 1 y 4 días), provocando retardos en tiempos de entrega, falsos positivos, y más aún, perdidas económicas. El objetivo de esta investigación fue el desarrollo de un sistema de detección para Salmonella typhimurium en tomate comparando imágenes hiperespectrales contra técnicas tradicionales de detección. La cámara PIKE F-210B acoplado a un espectrógrafo ImSpector V10E fue utilizado para la captura de imágenes hiperespectrales; con una resolución espacial de 1920x1080 pixeles, un rango espectral de 400 – 1000 nm, con intervalos de 2.8 nm y una rejilla de 30 µm, la cámara es capaz de procesar 28 fotogramas por segundo. Un área (región de interés) de 1 cm^2 se utilizó para la obtención y análisis de firmas espectrales, y así posteriormente determinar la presencia o ausencia de bacteria. Análisis de Componentes principales (ACP) fue utilizada para la selección de la longitud de onda óptima para la detección temprana de Salmonella typhimurium. Esta metodología puede ser adaptada para diferentes cultivos y podría detectar diferentes patógenos en un esfuerzo de mantener alta calidad y seguridad en productos frescos.

Palabras clave: bioensayos, imágenes hiperespectrales, PCA, longitud de onda.

1. Introducción

Las imágenes hiperespectrales combinan la adquisición convencional de imágenes con la espectroscopia, para adquirir información espectral y espacial de un objeto. El análisis de estos datos es difícil de procesar debido a su gran volumen [1] como resultado es necesario seleccionar propiamente una banda de trabajo y minimizar tiempos de procesado. Una imagen hiperespectral consiste en una colección de pixeles, cada pixel contiene un valor digital que representa la conversión digital de la reflexión de luz en un número digital, con cámaras convencionales esto es por lo general en tres longitudes de onda (rojo, verde y azul). Por el contrario las imágenes hiperespectrales cuentan con diferentes longitudes de onda (400-1000 nm), las cuales son sobrepuestas en capas una tras otra, combinándolas en un hipercubo [2].

Sistemas automáticos de visión han sido implementados para la detección de defectos, ayudando a reducir la tarea tediosa de clasificar y seleccionar productos agrícolas de baja calidad visual. El procesamiento de imágenes está siendo cada vez más aceptada como un evaluador de aspectos cualitativos en productos alimenticios [3]. Ejemplo de aplicación del procesamiento digital de imágenes para la selección de tomates por grado de maduración y contenido de licopeno, fue la de [4]

ISBN: 978-607-9394-14-1.



donde demostraron que el tiempo de procesamiento y precisión del sistema, lograda con una matriz de puertas programables (FPGA, por sus siglas en ingles), era superior a criterios de selección visual, además, mostraron la ventaja de métodos no invasivos destructivos para la agroindustria. Sin embargo, la clasificación por métodos de visión de maquina permanece como un reto en términos de precisión.

Esfuerzos para la aplicación de esta tecnología están iniciando a obtener buenos resultados para la detección de contaminantes en superficies de productos de consumo humano. Investigadores han trabajado en la detección de residuos fecales en la superficie de manzanas, dando gran importancia y valor a esta técnica [5]. Otra aplicación potencial de esta metodología ha sido la de evaluar y detectar contaminantes en la producción de aves de corral, utilizando algoritmos de ángulo mapeador espectral (Spectral Angle Mapper por sus siglas en inglés) [6]. Además, existen estudios de residuos fecales en melón [7]. Actualmente, en México se utiliza la clasificación y evaluación de frutos de tomate con sistemas de procesamiento de imágenes, los cuales clasifican los tomates basado en sus pesos y sus medidas. Estos sistemas de visión pueden procesar al menos 8 toneladas de tomate en cuestión de minutos; sin embargo, la bacteria *Salmonella* spp. no es detectada por estos medios. Adicionalmente, productores mexicanos están siendo afectados por las sanciones impuestas por Estados Unidos por sospechas de frutos contaminados con diferentes patógenos.

Se estima que por año un promedio de 1,000,000 de casos de enfermedades son provocadas por Salmonella spp., de las cuales 380 resultan en muerte, esto fue reportado entre 2000 y 2008 [8]. La importancia comercial del tomate en México, genera la necesidad de evaluar constantemente los productos del campo, en un intento por exportar tomates totalmente inocuos, un método tradicional estándar para la detección de *Salmonella* y sus diferentes serotipos, incluyen un proceso de muestreo, destrucción de la muestra y siembra en medios de cultivo selectivos [9]

Avances en la manufactura y desarrollo de cámaras de sensores CCD y CMOS, espectroscopia de alta resolución y computadoras con software de alto poder (por ejemplo, MATLAB, ENVI y librerías de acceso abierto en C++) convierten a esta tecnología como una aplicación emergente para la seguridad alimentaria, conservación de pinturas históricas, y la posibilidad de evaluar la composición físico-quimica de productos alimenticios. De acuerdo a [10], las imágenes hiperespectrales surgen como una tecnología que promete inspeccionar interna y externamente productos alimenticios, adquiriendo firmas espectrales las cuales son señales dentro del espectro electromagnético (Visible y parte del infrarrojo). Ejemplos de aplicaciones de imágenes hiperespectrales incluyen detección de fisuras y otros defectos en manzanas [11], [12], [13], madurez de tomate [14], evaluación de daño en citricos [15] y evaluación de daño por congelación en hongos comestibles [16], etc.

En este proyecto de investigación se tiene los siguientes objetivos: 1) Determinar las características espectrales de la bacteria *Salmonella typhimurium* bajo condiciones de iluminación del espectro visible y en la zona cercana al infrarrojo. 2) Encontrar patrones que permitan determinar la presencia del agente contaminante *Salmonella typhimurium* con análisis de componentes principales.

2. Materiales y métodos

2.1 Material biotecnológico.

Se utilizó Salmonella typhimurium, suspendida en un medio de cultivo en estado de crio-preservación. El experimento utilizo medio selectivo de cultivo comercial Salmonella-Shigella (SS agar), Hektoen enteric y XLD (Xylose Lysine Deoxycholate agar). Para la siembra de la bacteria se utilizó el método de estriado en plato aislado, para mostrar y seleccionar las colonias formadoras de bacterias más fácilmente. Este procedimiento fue realizado por triplicado. Un tubo de ensayo con 5 mL

ISBN: 978-607-9394-14-1.



de caldo tetrationato fue inoculado con la cepa *Salmonella typhimurium*. Este medio de cultivo contiene peptona y carbonato de sodio, y la selectividad es resultado de la presencia de tiosulfato de sodio que genera tetrationato cuando se agrega en una proporción de 0.2% de solución yoduro-yoduro y 0.1% de verde brillante en cada tubo, permitiendo el crecimiento de la bacteria la cual contiene la encima reductasa tetrationato, e inhibe el desarrollo de otros microorganismos acompañantes. El tiempo de incubación fue de 24 horas a una temperatura de 37 ° C en condiciones aeróbicas.

2.2 Muestras de tomate.

Cuatro muestras de tomate (variedad Roma) fueron elegidas en un estado de post-cosecha, y comprados en un mercado local en el municipio de General Escobedo, Nuevo León, México. Los tomates cumplieron con alta calidad visual.

2.3 Estructura del sistema hiperespectral y componentes.

Un motor de tres fases de 372.85 W (0.5 HP) propulsa a una cinta transportadora. El motor fue acoplado a una transmisión mecánica, y además, fue controlado con un drive de variación de frecuencia (VFD) GS1 0.25-0.5 HP, 120 VAC (Automation Direct), con frecuencia de 0 a 60 Hz. El dispositivo tiene entradas analógicas (AI), entradas digitales (D11,D12,D13, D14) para el control de dirección y velocidad. El sistema de iluminación cuenta dos lámparas de 50 W de tungsteno-halógeno.

2.4 Cámara hiperespectral.

El sistema consiste de una cámara PIKE F-210B y un espectrógrafo V10E capaz de tomar imágenes con resolución espacial de 1920x1090 pixeles con un rango espectral de 400-1000 nm con intervalos de 2.8 nm y una abertura de 30 µm. La cámara cuenta con un protocolo de comunicación IEEE 1394b-FireWire800, con tasa de transmisión de 800Mbit s^{-1} , la velocidad máxima de adquisición de la cámara es de 32 cuadros por segundo. El sistema se muestra en la Figura 1.

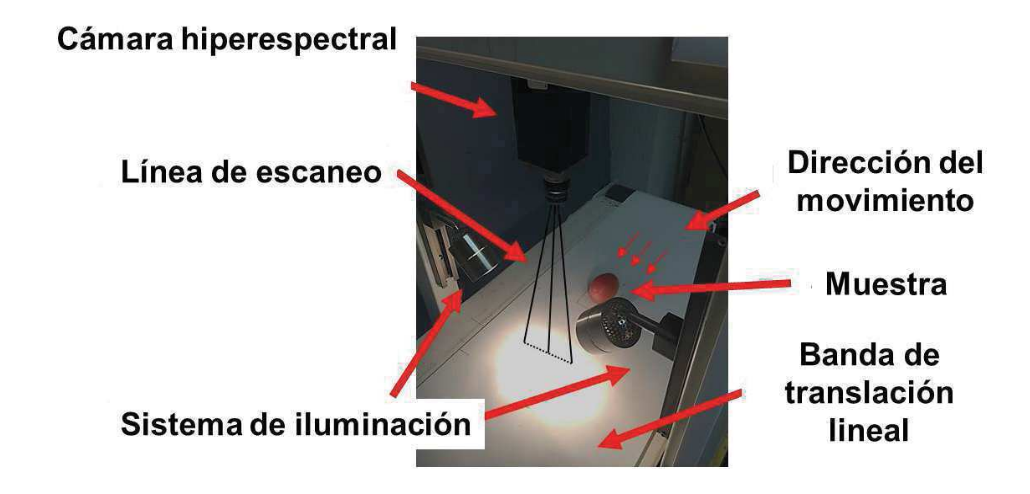


Figura 1. Sistema de imágenes hiperespectrales.

2.5 Adquisición de imágenes hiperespectrales e Inoculación de tomate con Salmonella typhimurium.

Vimba es el driver proporcionado por la empresa Allied Vision Technologies (AVT GmbH), y se utilizó para el control de la cámara por medio de una PC, gracias a este driver es posible utilizar C,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



C++, .NET y MATLAB como lenguaje de programación. El paquete proporciona el software AVT Vimba Viewer, el cual fue utilizado para monitorear la correcta operación de la cámara. Además, se utilizó MATLAB 2016a para el control de encendido del motor, los comandos de encendido, apagado y velocidad de la banda fueron realizadas por medio de un Arduino UNO.

El diagrama de flujo (Figura 2) fue propuesto para realizar la adquisición de las imágenes hiperespectrales, se debe contemplar que la velocidad de la banda (motor) debe estar en sincronía con la velocidad de adquisición de la cámara, esto se debe principalmente a que el método de funcionamiento de la cámara es un barrido lineal (PUSHBROOM Line Scanning).

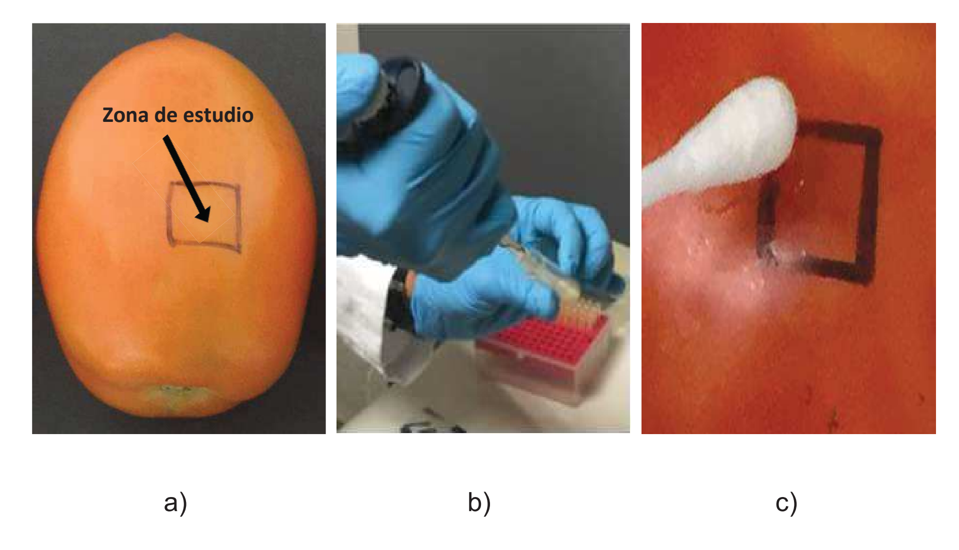


Figura 2. Diagrama de flujo de adquisición de las imágenes hiperespectrales.

Un rectángulo fue dibujado en cada tomate utilizando un marcador, el área fue 1 cm^2, como se muestra en la figura 3a. 10 µL de *Salmonella typhimurium* fue extraída y colocada sobre el área de 1 cm^2 con una micropipeta de precisión (Figura 3b), una gota fue distribuida sobre la superficie, tratando de no desbordar el liquido fuera del área marcada (Figura 3c).

ISBN: 978-607-9394-14-1.





a) b) c)

Figura 3. a) área contaminada, b) extracción de 10 µL de *Salmonella typhimurium*, c) distribución de gota en la superficie usando un hisopo estéril.

Cada tomate fue escaneado con la metodología de escaneo lineal con el sistema de imágenes hiperespectrales. El escaneo lineal se realizó en dos periodos de 30 minutos y después 2 periodos de 240 min, esto con la finalidad de permitir la multiplicación de la bacteria en la superficie del tomate. Un total de 600 cuadros fueron adquiridos, posteriormente, los datos fueron almacenados y procesados en una computadora.

2.6 Análisis de componentes principales para el procesado de los datos

Los pixeles de la zona contaminada fueron procesados con el método multivariado de Análisis de Componentes Principales (PCA, en inglés), un arreglo matricial de dos dimensiones fue creado donde en la primera columna se asignaron el % de reflexión y la segunda columna contenía los valores de longitud de onda (λ) (400 – 1000 nm), una vez definido la matriz de 2x600, el método de valor singular de descomposición se utilizó [17],[18].

2.7 Firma espectral de tomates contaminados y no contaminados

Las firmas espectrales se crearon a traes de los pixeles fijos sobre todo el fotograma, en el eje-x se calculó la longitud de onda especifica (λ, la formula fue estimada y proporcionada por Specim Spectral Imaging Ltd.). Sobre el eje-y se grafica el valor de reflexión expresado en porcentaje (%). Este valor representa la cantidad de luz reflejada por la superficie de tomate.

3.Resultados

3.1 Firma espectral.

La figura 4 muestra la firma hiperespectral de un tomate antes de ser contaminado con *Salmonella typhimurium.* Es posible remarcar que la curva alcanza su máxima amplitud en 0.87% de reflexión de luz. Entre 650 – 677 nm se obtuvo una región constante con un valor aproximado de 0.7% de reflexión, este es porque el tomate tiene una cierta cantidad de color verde, esto se debe a la maduración del tomate. En 715 nm se muestra que la firma hiperespectral decrece constantemente, comportándose como una línea recta con pendiente negativa, este comportamiento permanece hasta los 950 nm.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



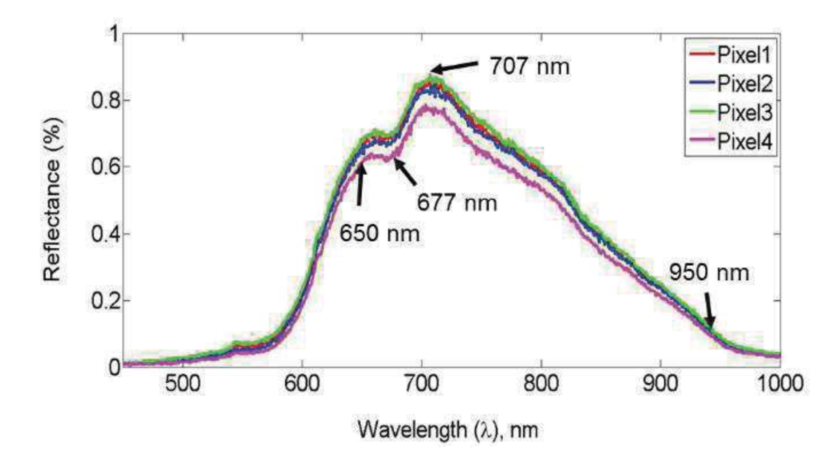


Figura 4. Firmas espectrales de los pixeles tomados aleatoriamente de zonas no contaminada de un fruto de tomate.

Por otra parte, la Figura 5 muestra la firma espectral de los tomates, 12 horas después de ser contaminado, tiempo que permitió el crecimiento de la bacteria.

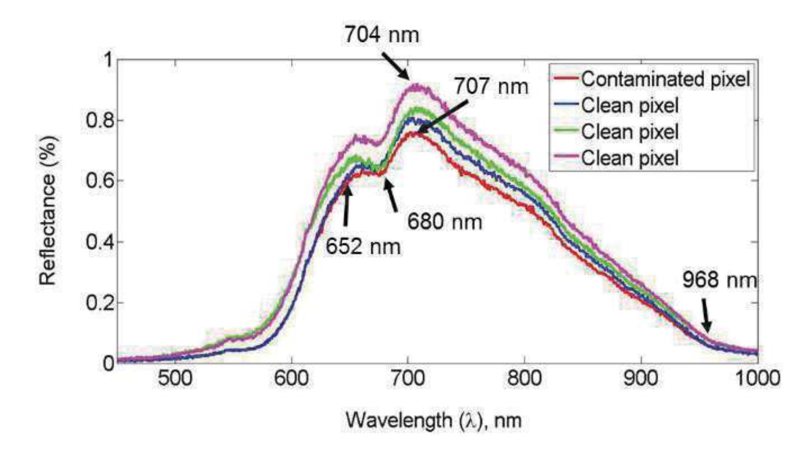


Figura 5. Pixel contaminado (línea roja) y zonas no contaminadas (azul, verde y magenta).

La firma espectral fue extraída de una región de interés dentro de la zona contaminada con coordenadas (870,394). Los pixeles representados por la línea rojo muestran que la longitud de onda 707 nm tiene una amplitud de 0.71% de reflexión, mientras en otra zona el pixel analizado incrementa la amplitud de la respuesta. El pixel con coordenadas (880,274), representado por la línea magenta, tiene su máxima amplitud con 0.9412 % de reflexión cuando la longitud de onda es 704 nm. El rango entre 652-680 nm tuvo una amplitud media de reflexión de 0.6 %, para la firma espectral de la región contaminada y una amplitud de 0.76% de reflexión para la máxima amplitud registrada (representada por la línea color magenta). Además, existió un comportamiento decreciente (con pendiente negativa), que inicia en 705 nm y se estabiliza hasta 968 nm.

3.2 Evaluación visual y por imágenes hiperespectrales (Hipercubo).

La Figura 6a muestra un fruto de tomate después de 12 horas de inoculación de la bacteria *Salmonella typhimurium* en cuatro longitudes de onda significativas (637, 652, 704 y 707 nm)

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 461-470.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



utilizadas para crear un hipercubo y poder reconstruir una imagen. La longitud de onda 637 nm fue utilizada como control (Figura 6b).

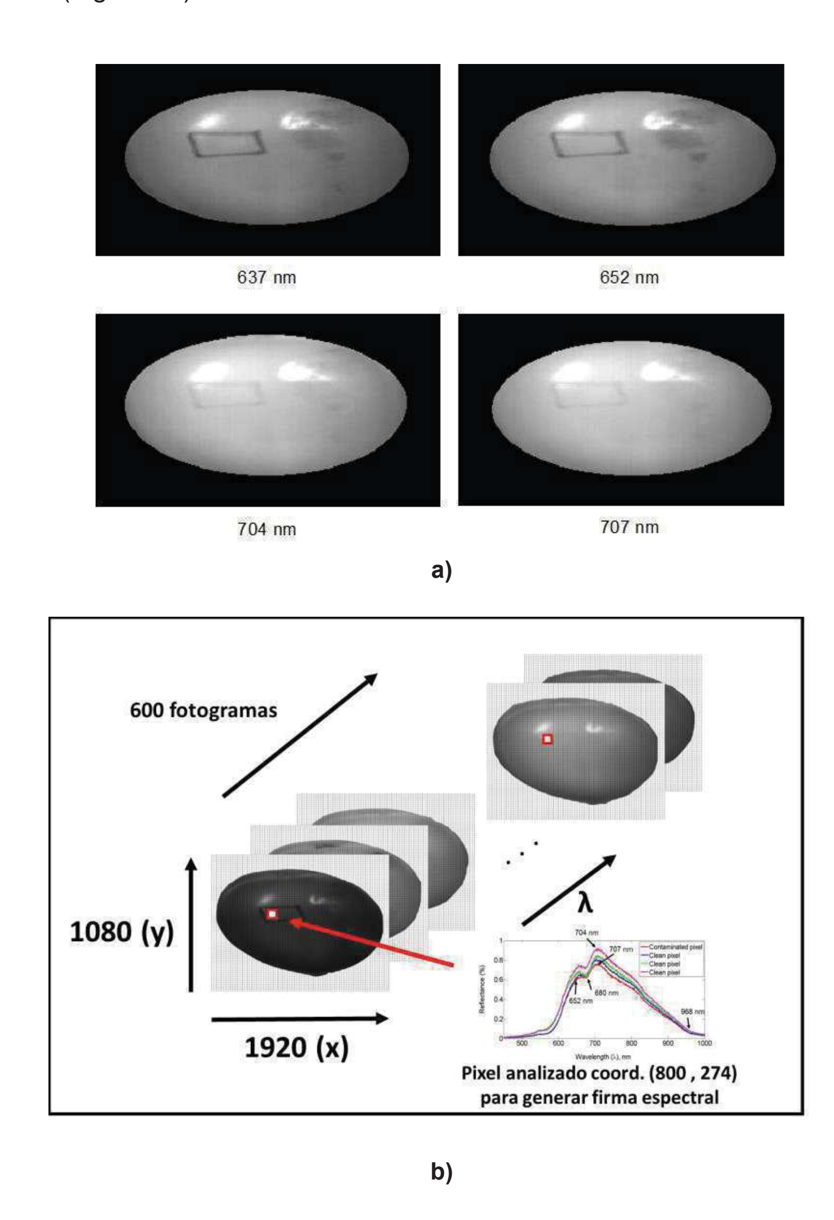


Figura 6. a) Hipercubo de 4 tomates contaminados con *Salmonella typhimurium,* b) Hipercubo, generado de 600 fotogramas, coordenadas espaciales (x,y) y longitudes de onda como profundidad (λ), se puede visualizar como un cubo de tres dimensiones.

En las longitudes de onda 637 nm y 652 nm, la absorción de luz ocurrió en la región superior del tomate, esto es interpretado como un golpe en el fruto, el cual se muestra como una manca en 637 y 625 nm en el hipercubo. El pixel contaminado con coordenadas (870,274) está localizado dentro del área marcada por 1 cm^2 cuadrado, una pequeña diferencia significativa es observada visualmente en diferentes longitudes de onda. El hipercubo formado con 600 fotogramas tomados por la cámara utilizaron la técnica de escaneo lineal en el rango de 400 – 1000 nm. Algunas imágenes no pudieron ser reconstruidas debido a su baja reflexión en la zona ultravioleta (330 – 400 nm), los mismo sucede en la zona infrarroja (700 – 1000 nm), estas imágenes contenían pixeles con valores menores a 0.1 % de reflexión.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.3 Análisis de patrones y detección por PCA.

La figura 7 muestra la proyección de los datos de un tomate sin inoculación superficial, la proyección tiene dos componentes principales, y se observa que la componente principal 1 (marcada en verde) es la componente con ajusta casi la totalidad de los datos.

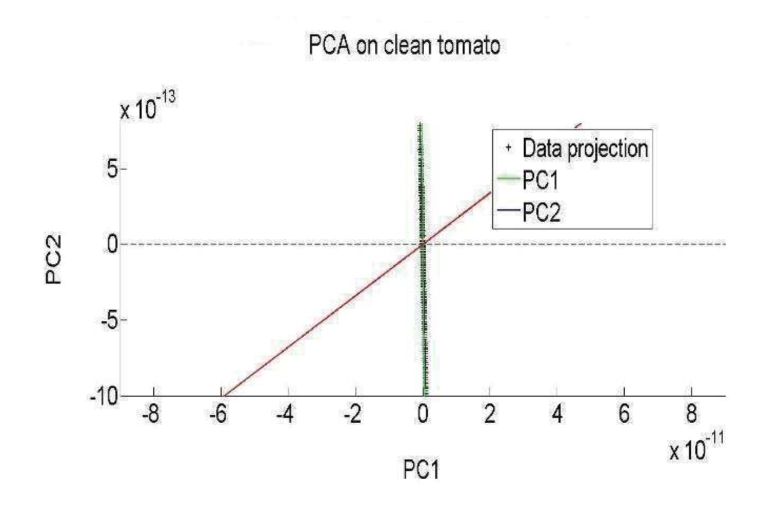


Figura 7. PCA de un tomate antes de ser contaminado con *Salmonella*.

La componente principal 2 (PC2, línea roja) tiene pobre influencia en la proyección de los datos en su eje, además, tiene una pendiente positiva, la participación de ambas componentes es mostrada en la figura 8.

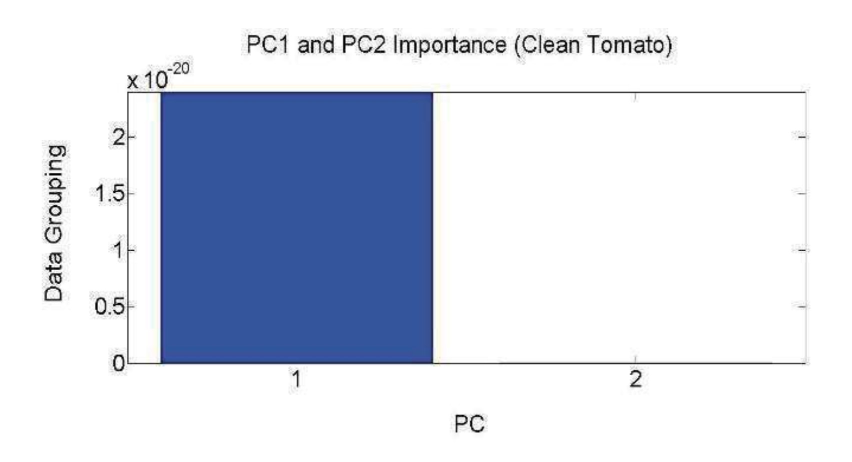


Figura 8. Importancia de PC1 y PC2; PC1 tiene la mayoría de los datos proyectados.

La figura 9 muestra la gráfica de PCA del mismo tomate 12 horas después de ser contaminado, aquí la pendiente de la PC1 es negativa.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 36, pp. 461-470.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





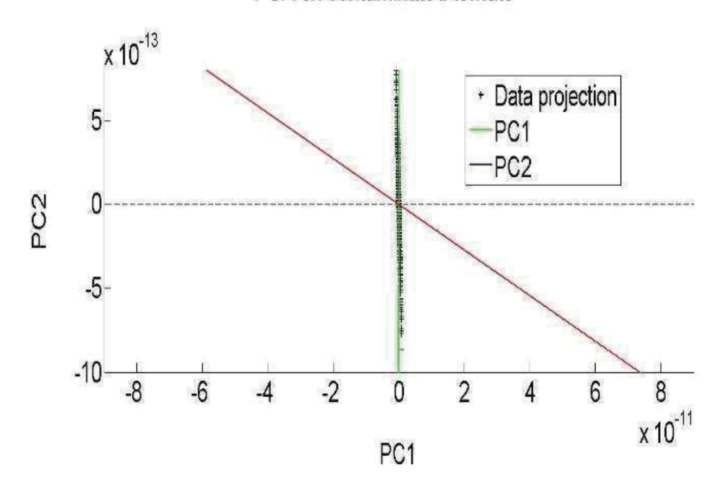


Figura 9. PCA de tomate, 12 horas después de ser contaminado.

4. Discusión

Las firmas espectrales en figura 4 y 5 mostraron que la longitud de onda especifica de 707 nm puede ser utilizado como indicador para la detección de *Salmonella typhimurium* con un decremento de 0-17% de reflexión entre la firma espectral del tomate antes de ser contaminado y la firma adquirida después de 12 horas de ser contaminado. Por otra parte, la comparación de las dos firmas espectrales mostro un incremento en % de reflexión en la región de 680 a 720 nm en la zona contaminada, esto resulta de la maduración y cambio de color del mismo fruto, el cual tiene un porcentaje pequeño de color verde. El análisis realizado en las imágenes de la figura 6a, con longitud de onda especifica mostro poca variación de reflexión en el área afectada por *Salmonella typhimurium*, por lo que, en el desarrollo de esta investigación se encontró que el tipo de iluminación empleada no fue la suficiente para incrementar la potencia lumínica en la región infrarroja. La técnica de PCA aplicada en los tomates contaminados y no contaminados, mostro que la componente 2 con pendiente negativa puede ser relacionada o utilizada como un indicador de la presencia de *Salmonella typhimurium*.

5. Conclusión

La tecnología de imágenes hiperespectrales es una metodología emergente y prometedora. En esta investigación, se observó que la cámara PIKE F210B con espectrógrafo ImSpector V10E y PCA como metodología de clasificación, fue capaz de detectar y discriminar *Salmonella*. Para remarcar la importancia de esta técnica se debe mencionar que el proceso tomo entre 5 y 10 minutos para ejecutarse, reduciendo significativamente el tiempo de confirmación que puede variar dependiendo de la técnica utilizada, entre 12 a 120 horas. Por otro lado, aliméntenos sin agentes contaminantes es un tema de interés científico a nivel internacional.

El principio de funcionamiento de las imágenes hiperespectrales está basado en las firmas espectrales, las cuales se podrían comparar a una huella dactilar en el espectro electromagnético, por lo que es poco probable que una imagen hiperespectral muestre dos firmas iguales o similares para dos objetos de aspecto y composición diferente. Sin embargo, técnicas avanzadas de clasificación de patrones, como redes neuronales, pueden llegar a tener falsos positivos o falsos negativos cuando la red es sobreentrenada, llegando a dar malos resultados [19].



Referencias

[1] T. Tao, "*Multispectral Method for Apple Defect Detection Using Hyperspectral Imaging System*", University of Maryland, 2011.

[2] M. Kamruzzaman, D. Barbin, G. Elmasry, D.-W. Sun, and P. Allen, "*Potential of hyperspectral imaging and pattern recognition for categorization and authentication of red meat"*, vol. 16. 2012.

[3] I. I. Kavdir and D. E. D. E. Guyer, "*Apple sorting using artificial neural networks and spectral imaging*", *Trans. ASAE*, vol. 45, no. 6, p. 1995, 2002.

[4] Gastélum Barrios, A. *Sistema basado en análisis de imágenes implementado en FPGA para estimar el grado de madurez y contenido de licopeno en tomate rojo* (Doctoral dissertation), 2012.

[5] M. S. Kim, A. M. Lefcourt, K. Chao, Y. R. Chen, I. Kim, and D. E. Chan, "*Multispectral Detection of Fecal Contamination on Apples based on Hyperspectral Imagery: Part I. Application of Visible and Near-Infrared Refrectance Imaging*", *Trans. ASAE*, vol. 45, no. 6, pp. 2027–2037, 2002.

[6] B. Park, W. R. Windham, K. C. Lawrence, and D. P. Smith, "*Contaminant Classification of Poultry Hyperspectral Imagery using a Spectral Angle Mapper Algorithm*", *Biosyst. Eng.*, vol. 96, no. 3, pp. 323–333, 2007.

[7] A. M. Vargas *et al.*, "*Detection of Fecal Contamination on Cantaloupes Using Hyperspectral Fluorescence Imagery*", *J. Food Sci.*, vol. 70, no. 8, pp. e471–e476, Oct. 2005.

[8] E. Scallan *et al.*, "Foodborne illness acquired in the United States--major pathogens.," *Emerg. Infect. Dis.*, vol. 17, no. 1, pp. 7–15, Jan. 2011.

[9] Esquivel-Valenzuela, B., Gallegos-Robles, M. Á., Vázquez-Vázquez, C., Salazar-Sosa, E., García-Hernández, J. L., Orona-Castillo, I., & Idilio, H. DETECCIÓN DE Salmonella spp. EN TOMATE MEDIANTE MÉTODOS MICROBIOLÓGICOS, Vol. 1, No.1, pp.162-166, 2016.

[10] J. Aguzzi *et al.*, "*Contributors in Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control"*, 2010, pp. ix–xi.

[11] W. Huang, B. Zhang, J. Li, and C. Zhang, "*Early detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral image*", in *TRANS. ASAE*, 2013, p. 87610P.

[12] P. M. Mehl, Y.-R. Chen, M. S. Kim, and D. E. Chan, "*Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations*", *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 67–81, Jan. 2004.

[13] J. Xing, W. Saeys, and J. De Baerdemaeker, "*Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples*", *Comput. Electron. Agric.*, vol. 56, no. 1, pp. 1–13, Mar. 2007.

[14] G. Polder, G. W. A. M. van der Heijden, and I. T. Young, "*Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes*", *Trans. ASAE*, vol. 45, no. 4, pp. 1155–1161, 2002.

[15] J. Qin, T. F. Burks, M. A. Ritenour, and W. G. Bonn, "*Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence*", *J. Food Eng.*, vol. 93, no. 2, pp. 183–191, Jul. 2009.

[16] A. A. Gowen, M. Taghizadeh, and C. P. O'Donnell, "*Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging*", *J. Food Eng.*, vol. 93, no. 1, pp. 7–12, Jul. 2009.

[17] M. Richardson, "*Principal Components Analysis*", SE, 2009.

[18] Zhang, J., Erway, J., Hu, X., Zhang, Q., & Plemmons, R., Randomized SVD methods in hyperspectral imaging. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, *2012*.

[19] I. Bilbao and J. Bilbao, "Overfitting problem and the over-training in the era of data, Particularly for Artificial Neural Networks," no. Icicis, pp. 154–159, 2017.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 471-480.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño e Implementación de un Controlador PI para un Convertidor CD-CD Elevador

García de la Rosa Cedrid Alejandro y López Castañón Carlos Eduardo

Universidad Autónoma de Guadalajara, Campus Tabasco, Villahermosa, Tabasco.

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un controlador PI a un convertidor elevador, obtenido por MATLAB mediante la función SIMULINK. Este convertidor se encarga de elevar la tensión de salida con respecto a la entrada. El controlador se implementó en un sistema de carga de baterías alimentados por paneles solares. El convertidor está diseñado para una tensión de entrada oscilante generada por un panel solar de 250W, a la salida se genera una tensión de 15V, que están dedicados a cargar una batería de 12V que a su vez está conectado a un inversor para el suministro de energía alterna hacia aplicaciones de baja potencia como lo son el alumbrado de hogares u oficinas. Debido a que los sistemas de paneles solares convencionales no cuentan con un controlador especializado que permita el mayor aprovechamiento de la incidencia solar, se diseñó el controlador Proporcional Integral con el fin de hacer más eficiente el suministro eléctrico hacia un hogar/oficina por medio de un sistema de paneles solares, quiere decir, que en este artículo se logró realizar un controlador Proporcional Integral que fuese capaz de recibir escasa incidencia solar como entrada, y que a su vez seria transformada en energía eléctrica para así cargar las baterías del sistema como si se presentara una buena incidencia solar.

Palabras clave: Electrónica de potencia, controlador PI, convertidor elevador, sistema de carga de baterías, paneles solares, PWM.

1. Introducción

En diversas áreas de la ingeniería es necesario elevar el nivel de tensión a un nivel mayor al de entrada de forma mantenida, a estos circuitos de potencia se les conoce como convertidor elevador (Boost), este circuito forma parte de los convertidores CD-CD (Corriente Directa). Estos convertidores son usualmente utilizados en el sector de control por su gran eficiencia. Específicamente, en este artículo se analiza la aplicación de un circuito convertidor elevador a un sistema de carga de baterías eficiente alimentado por medio de un conjunto de paneles solares. La energía almacenada en las baterías está dedicada a suministrar corriente alterna por medio de un inversor CD-AC (Corriente Directa-Corriente Alterna) para aplicaciones de baja potencia como el alumbrado de una residencia y/o oficinas.

Se diseñó e implemento un controlador PI (Proporcional-Integral) donde las constantes Kp y Ki del controlador se calculan por medio del teorema de Routh-Hurwitz que es programado en una placa de desarrollo de hardware, la cual genera un PWM (Pulse Width Modulation) que se encarga de modificar el ciclo de trabajo de la conmutación del transistor tipo MOSFET de potencia en el circuito convertidor elevador y así el condensador almacenara la mayor cantidad de energía que le sea posible reduciendo al máximo las pérdidas. Una vez generado el voltaje estable necesario, este voltaje pasa a un inversor de tipo CD-AC, el cual su función principal es de transformar la corriente directa proveniente de las baterías a corriente alterna para así ser utilizada en aparatos eléctricos, iluminación y diferentes aplicaciones en lo que viene siendo hogares u oficinas.

2. Descripción del método

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1 Descripción del problema

En la actualidad se busca la forma de obtener energía limpia de los recursos naturales renovables como es el caso de la energía solar, esta se absorbe por medio de paneles solares, en donde la energía solar es transformada en energía eléctrica y almacenada en baterías de 12V. Una vez almacenada dicha energía en forma de corriente directa (CD) se le adiciona un inversor de voltaje de CD-AC para poderse usar en cualquier electrodoméstico de uso cotidiano. En este tipo de sistemas de paneles solares el problema se presenta en el sector de la carga de baterías dado que para poder cargar una batería convencional de 12V se necesita un voltaje superior y el panel solar solo suministra 12V y esto depende de la incidencia de la radiación solar absorbida, esto quiere decir que en la puesta de sol o en un día nublado el panel puede suministrar un voltaje menor a los 12V. Por tal razón al tener un diferencial de potencial menor al de la batería está no se cargaría siendo un desperdicio de energía y lo que se desea es aprovechar al máximo la energía suministrada por el panel solar y esto se puede lograr con la implementación de un sistema de control en un convertidor elevador.

2.2 Convertidor elevador

En un convertidor elevador, el voltaje a la salida siempre será mayor que el voltaje a la entrada, de ahí la palabra "elevador". En la Figura 1 se muestra como un convertidor elevador utilizando un transistor tipo MOSFET de potencia, el cual es conmutado con una frecuencia constante obtenida del PWM generado por la placa de desarrollo, un diodo zener con la función de obstruir el flujo de energía hacia el inductor L y el MOSFET, un inductor que almacena y carga al mismo tiempo el capacitor C, este elemento se encarga del almacenamiento de energía, el funcionamiento de estos componentes en el circuito, logran elevar el voltaje de salida a un nivel deseado con respecto a la entrada.

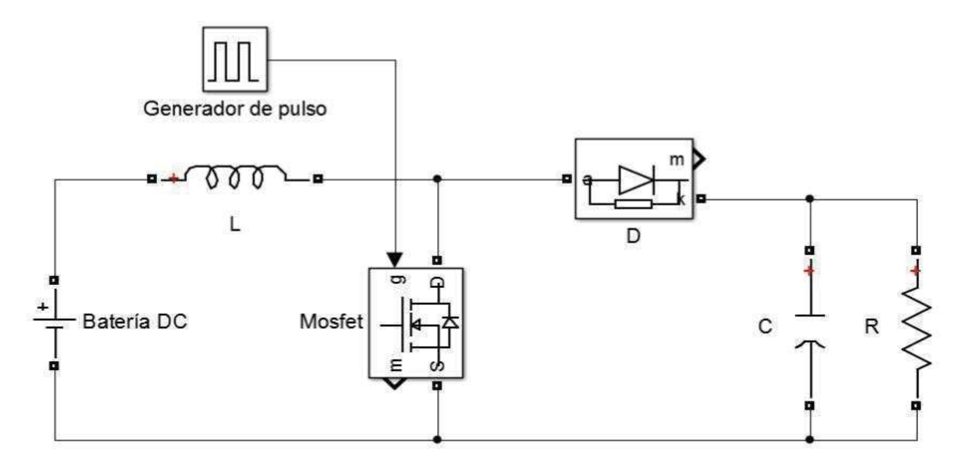


Figura 1. Convertidor elevador (*Boost*)

La operación del circuito se divide en dos estados uno activo (μ=1) y otro inactivo (μ=0) como se puede ver los circuitos equivalentes en la Figura 2 y Figura 3. El estado activo (μ=1) es cuando se activa el MOSFET de potencia y la corriente de entrada que se eleva fluye a través del inductor L y del MOSFET. En el estado inactivo (μ=0) cuando se desactiva el MOSFET, la corriente ahora fluirá a través de C, L, la carga y el diodo de recuperación rápida. Debido a que solo se tiene un MOSTET su eficiencia es alta. La corriente es continua en todo momento. El voltaje a la salida tiene una sensibilidad alta debido a los cambios en el ciclo de trabajo u y puede ser difícil estabilizar el convertidor. Se debe tomar en cuenta que la corriente de salida es menor que la corriente del inductor en un factor (1-u) y una corriente rms mucho más alta fluirá a través del capacitor C.



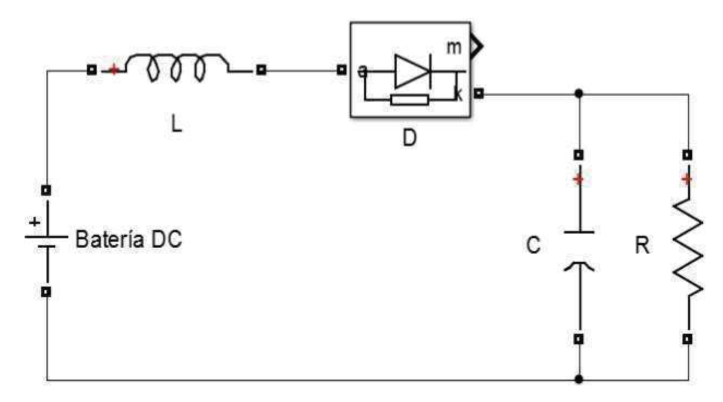


Figura 2. Circuito *Boost* (μ =0).

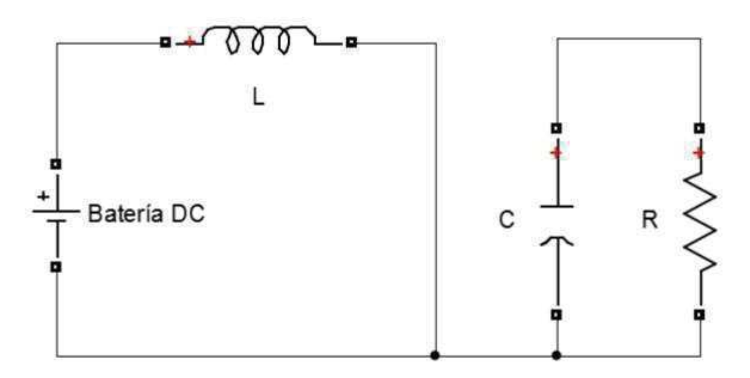


Figura 3. Circuito *Boost* (μ =1).

La variable que se desea controlar para regular el voltaje a la salida es el patrón de conmutación del MOSFET. Teniendo como estrategia conmutar el MOSFET a una frecuencia fija variando únicamente el tiempo de activación del mismo. La estrategia es usar un PWM, el cual se puede implementar a través de comparar una señal de diente de sierra(Vrampa) de frecuencia fija (f) y voltaje pico(Vmax), con un voltaje de referencia(Vref) para lograr el voltaje de activación, tal y como se muestra en la Figura 4. Teniendo en cuenta que se debe de cumplir siempre la condición que 0 ≤ Vref ≤ Vmax.

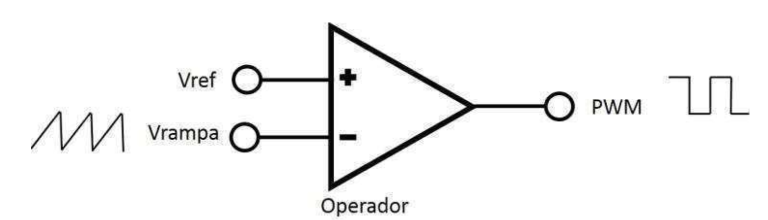


Figura 4. Circuito generador de PWM.

2.3 Modelado del convertidor elevador

Para realizar el análisis del modelado matemático del sistema se tienen que plantear dos diferentes sistemas de ecuaciones determinadas por el comportamiento del MOSFET, como se ilustra en la Figuras 2 y 3. En la figura 2 cuando la μ =0 se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$E = L\frac{di}{dt} + ir + v$$
$$i = C\frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} \tag{1}$$

De la misma forma se realiza el análisis para el circuito cuando μ =1 (véase Figura 3) se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$E = L\frac{di}{dt} + ir$$
$$C\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R} \tag{2}$$

Las ecuaciones 1 y 2 se pueden unificar utilizando el término u, ya que solamente se diferencian en un solo término correspondiente al voltaje y a la intensidad de corriente, respectivamente. Aplicando lo antes mencionado se multiplica el término u y resultan las siguientes ecuaciones unificadas:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(E - ir - uv)$$
$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{C}(ui - \frac{v}{R}) \tag{3}$$

De igual manera, las ecuaciones 3, se pueden escribir como un modelo de espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v}{L} \\ \frac{i}{C} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} -\frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} \tag{4}$$

Para su simulación, se debe considerar que se trabaja en un régimen permanente o en modo continuo de conducción (MCC), por lo que se debe considerar que la corriente de inductor y el voltaje del capacitor es constante e invariante en el tiempo, esta consideración tiene como resultado las ecuaciones 5:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\frac{2\mathrm{Lf}}{\mathrm{R}} \rangle u(1-u)^2$$

$$\mathrm{C} \rangle \frac{\mathrm{u}}{\mathrm{fR(rizo)}} \tag{5}$$

Como se puede observar el sistema de ecuaciones no es un sistema lineal, por lo que a partir de los puntos de equilibrio de las ecuaciones unificadas del sistema (igualadas a cero). Se puede obtener el siguiente modelo a través de la Matriz Jacobiana:

$$\Delta \frac{\mathrm{dx}}{\mathrm{dt}} = \frac{d\dot{x}}{dx}\Delta x + \frac{d\dot{x}}{du}\Delta u$$

$$\frac{\mathrm{d}\dot{\mathrm{x}}}{\mathrm{dx}} = \begin{bmatrix} \frac{df1}{di} & \frac{df1}{dv} \\ \frac{df2}{di} & \frac{df2}{dv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{\bar{u}}{L} \\ \frac{\bar{u}}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{d}\dot{\mathrm{x}}}{\mathrm{du}} = \begin{bmatrix} \frac{df1}{du} \\ \frac{df2}{du} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\bar{v}}{L} \\ \frac{\bar{I}}{L} \end{bmatrix}$$

De la ecuación 6 podemos obtener la siguiente Función de Transferencia:

$$\mathrm{G}_1(S) = \frac{-Vsalida}{(1-u)RC} \bullet \frac{S - \frac{R(1-u)^2}{L}}{S^2 + \frac{1}{RC} + \frac{(1-u)^2}{LC}} \tag{7}$$

Una vez obtenienda la función de transferencia (7) a través del método de estabilidad de Routh-Hurwitz podemos obtener los parámetros de las variables Kp y Ki para el controlador PI, los cuales son:

$$\mathrm{K_p} \langle \frac{(1-u)}{v_0}$$

$$\mathrm{K_i} \rangle 0 \tag{8}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$K_i < \frac{R(1-u)^2}{L} \bullet \frac{\left(K_p - \frac{(1-u)}{V_0}\right)\left(K_p + \frac{(1-u)}{V_0}\right)}{K_p - \frac{(1-u)}{V_0}\left(\frac{CR^2(1-u)^2}{L} + 1\right)}$$

Con estos parámetros obtenidos en las ecuaciones 8 se realizaron las simulaciones siguientes:

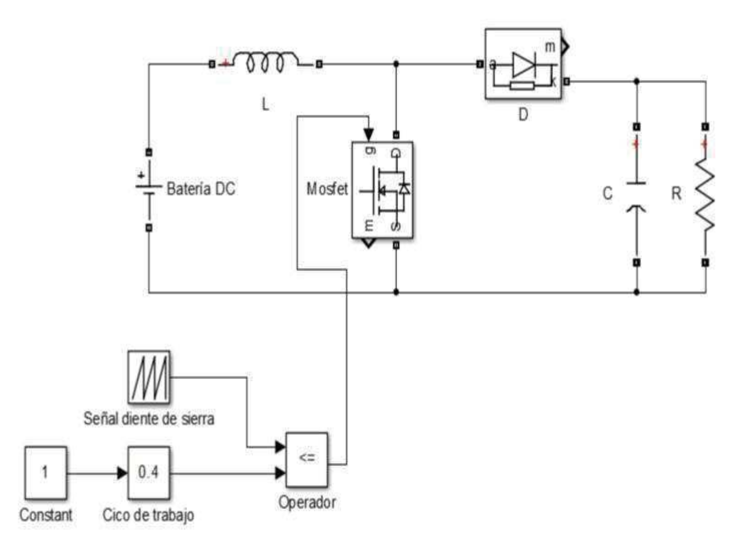


Figura 5. Simulación del convertidor sin controlador (u=40%).

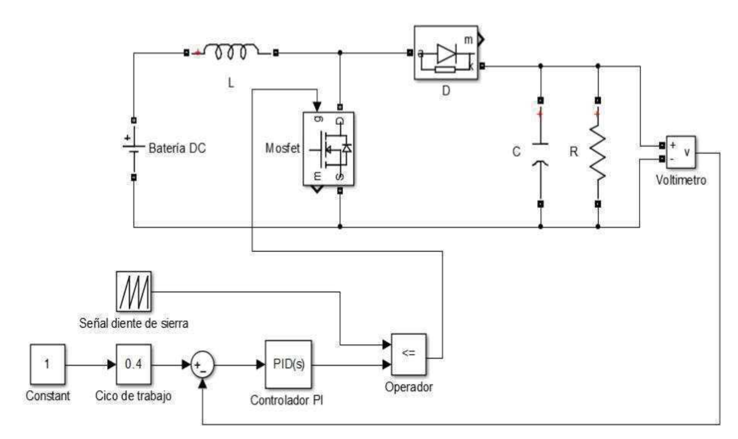


Figura 6. Simulación del convertidor con controlador PI (Vref=15V).

Como se puede observar en la Figura 5, el ciclo de trabajo es fijo y no varía con el tiempo ya que no se ha implementado el controlador PI. Se determinó el ciclo al 40% de forma experimental para lograr la salida aproximadamente en 15v con el 4% de error.

En la Figura 6, el circuito del convertidor contiene un controlador PI por lo que el ciclo de trabajo será cambiante en el tiempo hasta llegar al voltaje de salida deseado que será determinado como la entrada de referencia al controlador.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 37, pp. 471-480.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los valores de las constantes del controlador que fueron utilizados en el programa son los siguientes: (9)

$$Kp=0.01$$
$$Ki=500$$

3. Resultados

El resultado de la investigación incluye el análisis necesario para el desarrollo de un controlador para un Convertidor CD-CD elevador (Boost) y todos los parámetros para la obtención del mismo. Como se mencionó anteriormente, este controlador será implementado para la carga de baterías a través de paneles solares, aun así, se tomó la decisión de establecer todos los parámetros en forma general, dando así la oportunidad de implementarse en otras condiciones o para diferentes actividades, no exclusivamente para la carga de baterías.

Se tiene como resultado al utilizar el convertidor sin controlador la gráfica de la figura 7. teniendo un valor de voltaje constante a la entrada del circuito. Este circuito está diseñado para un valor constante a la entrada y así poderlo elevar al voltaje diseñado, pero al aplicarlo a la vida real el voltaje a la entrada es variante en el tiempo por lo cual a la salida se tendría como resultado un valor no deseado.

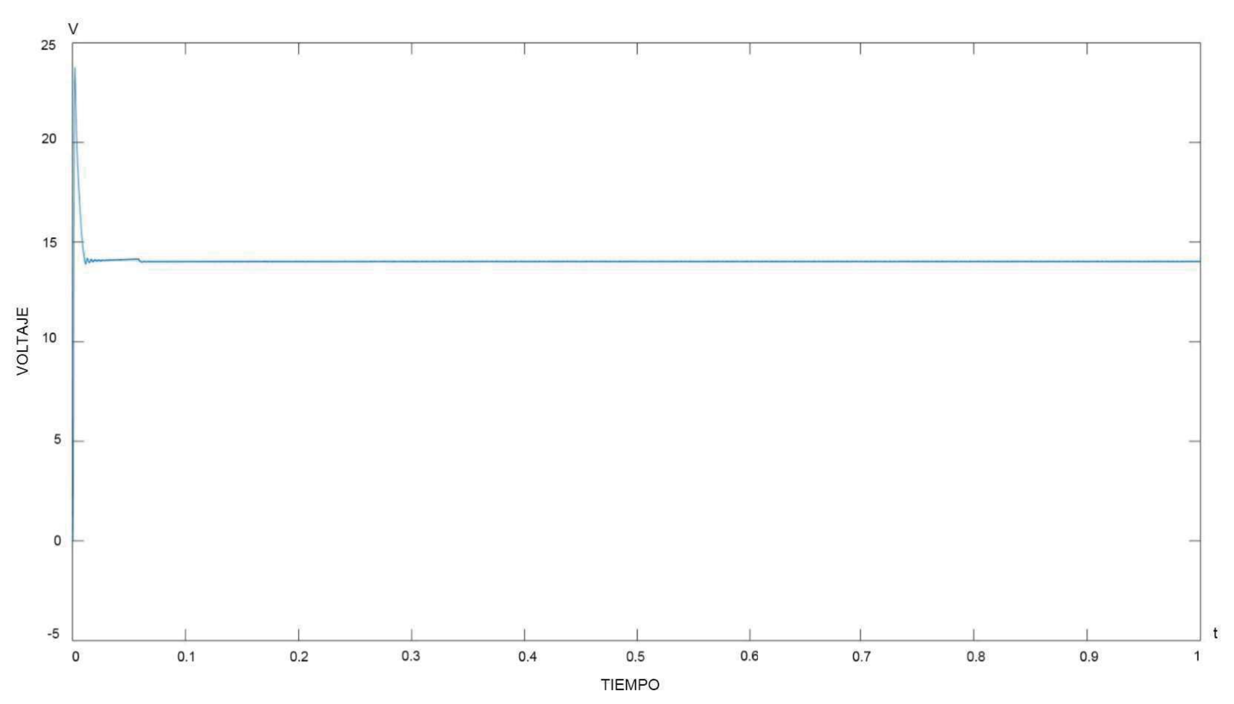


Figura 7. Grafica de Voltaje vs tiempo del Convertidor sin controlador.

Ahora utilizando el convertidor con el controlador PI se obtuvo la gráfica mostrada a continuación en la Figura 8. Teniendo como resultado a la salida un voltaje controlado y estable al contrario del convertidor sin controlador.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



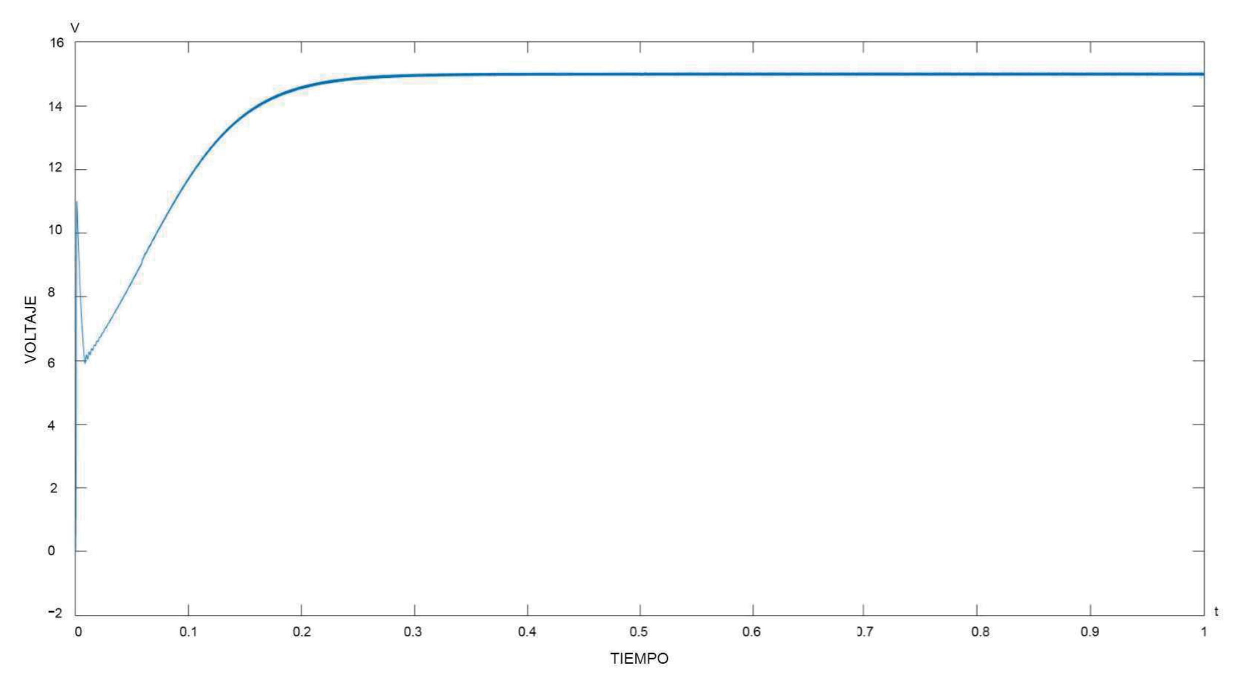


Figura 8. Grafica de Voltaje vs tiempo del Convertidor con controlador.

La implementación se llevó acabo en los paneles de la figura 9. y el circuito se agregó en el gabinete de la figura 10. Teniendo mayor eficiencia en la carga de las baterías.



Figura 9. Paneles solares.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 10. Gabinete con la implementación del circuito PI.

También es importante mencionar que, aunque no es un circuito muy complejo, cumple perfectamente con los parámetros planteados al inicio para resolver el problema de la carga de baterías y así, incrementar la eficiencia del circuito al momento de transmitir la energía hacia las baterías.

Los problemas que se pueden presentar al implementar esta propuesta depende mucho de los valores que se tomen en los componentes electrónicos, por ejemplo si utilizamos un inductancia L con un valor muy pequeño, se necesitaría una frecuencia de conmutación más alta, así como también, si utilizamos una capacitancia C más grande, no se generaría un pico de voltaje muy elevado y la respuesta del sistema sería más rápida que lo mostrado.

4. Conclusiones

Como se puede observar en la Figura 7 y 8, el controlador impide la pérdida de corriente que se observa en la Figura 8, lo que provoca que el voltaje de salida sea ligeramente menor al deseado (15 voltios). Cabe resaltar que en las simulaciones se puede apreciar un ligero pico de voltaje al inicio de la carga del capacitor, esto se puede evitar de varias formas para tener una curva más suave, sin embargo, para fines prácticos y debido al tiempo de respuesta del sistema (aproximadamente 0.2 segundos) no se consideró como un problema, ya que aplicado a la realidad es imperceptible y no es relevante en la implementación.

Se decidió utilizar un controlador PI y no un PID, ya que al momento de implementar el controlador PID, la parte diferencial del mismo es muy sensible a los cambios de voltaje y provoca un

ISBN: 978-607-9394-14-1.



comportamiento no deseado, se realizaron las pruebas, pero por no ser parte del objetivo principal del artículo se omitieron esos resultados.

4.1 Recomendaciones

Los investigadores interesados en continuar con el desarrollo de este tema podrían considerar el uso de un controlador más avanzado como es la Retroalimentación de Espacio de Estados, incluso utilizando observadores para las variables. Otro caso podría ser el estudio de otro tipo de circuito elevador más especializado o con doble inductancia y capacitancia en cascada, el cual podría funcionar mejor con el controlador de Espacio de Estados.

Referencias

[1] A. Kugi y K. Schlacher, “Nonlinear H∞ –Controller Design for DC-to-DC Power Converter”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 2, (1999).
[2] Hard, D. “Electrónica de potencia”, Pearson, (2001).
[3] Ogata, K. “Ingeniería de control moderna”, Prentice Hall, (1998).
[4] Pozo, A. “Convertidores conmutados de potencia”, Marcombo, (2012).
[5] Rashid, M. “Electrónica de potencia”, Pearson, (1995).
[6] Vicini, R. “Smart Grid, Fundamentos tecnologías y aplicaciones”, Cengage Learning, (2012).
[7] Bolton, W. “Ingeniería de Control”, 2ª Edición, Alfaomega, (2001).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Control PD y*Tanh* Aplicado a un Péndulo en Configuración Furuta Mediante una Plataforma Gráfica de Simulación

Mancilla Morales José Arturo[1], Sánchez Sánchez Pablo[2] y Antonio Michua Camarillo[2]

[1]Instituto Tecnológico de Tecomatlán
[2]Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP

Resumen

La simulación dinámica aplicada a robots manipuladores permite elegir distintos ambientes de simulación, analizar y estudiar la respuesta en el tiempo a través de diversas variaciones. Con base a lo anterior el objetivo de este trabajo fue simular la dinámica de un péndulo sub actuado en configuración Furuta de la empresa Quanser® mediante el control PD y Tanh para llevar al sistema a la posición deseada. La metodología empleada consistió en la obtención del modelo dinámico a través de las ecuaciones de Euler-Lagrange, así como la elección de la estructura de control mediante moldeo de energía, las cuales fueron el control PD y Tanh. Para la simulación de estas ecuaciones se utilizó el programa Matlab®. Se encontró que el control que permitió que el péndulo llegara a la posición deseada con un mejor desempeño fue el Tanh, esto se pudo afirmar al obtener el índice de desempeño de cada controlador. Por lo que para efectos de control se recomienda el control Tanh para el péndulo Furuta.

Palabras clave: Simulación, Péndulo Furuta, Control PD y Tanh, Sistema subactuado, Control de posición.

1. Introducción

La evolución de la robótica en los últimos años ha permitido llevar a estos autómatas a diferentes áreas productivas, industriales y de investigación, sustituyendo al hombre en tareas repetitivas y hostiles, adaptándose a los cambios. Una de las herramientas que ha permitido evaluar estos mecanismos sin la necesidad de tener los sistemas de forma física ha sido mediante simulación [1].

La simulación dinámica es una técnica que utiliza un conjunto de elementos con la finalidad de describir el comportamiento de un sistema. Los elementos que requiere una simulación por lo general son: a) modelo dinámico, el cual describe desde un punto de vista matemático el comportamiento del sistema a un estímulo, b) parámetros físicos del sistema, c) una estructura de control que hace que el robot manipulador alcance el objetivo deseado [2].

Uno de los sistemas mecatrónicos que han sido estudiados son los péndulos invertidos, los cuales son una familia de artefactos sub actuados, es decir que poseen menos actuadores que grados de libertad, lo que constituye un banco de pruebas interesante para la ingeniería de control no lineal [3]. El objetivo de estos prototipos consiste en llevar el péndulo en posición vertical invertida, para que de forma autónoma retroalimentando su posición y que el péndulo continuase en la posición invertida. El problema de este tipo de sistemas es controlar la posición del péndulo, ya que se busca estabilizar una posición inestable en lazo abierto lo que constituye un problema de control. Este problema, por su carácter local, puede resolverse con métodos lineales y no lineales [4].

El análisis de los primeros péndulos invertidos se dio en 1950, básicamente para realizar pruebas de control no lineal. El más estudiado de los miembros de esta familia es el denominado péndulo

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



invertido sobre una base móvil. Existen otros como el péndulo invertido con rueda de inercia, el Acrobot, el doble péndulo invertido, el pendubot y el péndulo en configuración Furuta [5].

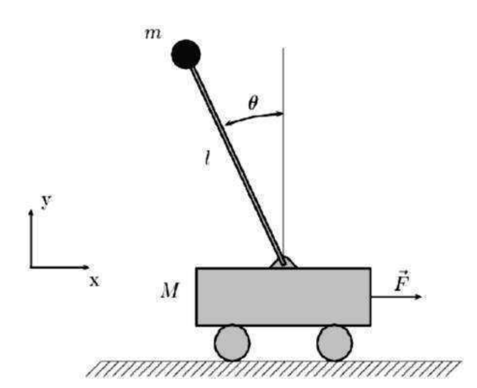


Figura 1. Péndulo invertido sobre una base móvil.

Este último aparece debido a las limitantes del péndulo invertido sobre una base móvil cuyas características estructurales tienen el problema de fin de carrera, es decir, la longitud de la guía donde se mueve la base que sostiene al péndulo es finita y en algunos experimentos no tiene la suficiente longitud para mantener el péndulo en la posición deseada [6].

Para evitar esta limitación Katsuhisa Furuta del Instituto de Robótica de Tokio, en 1970 propuso el péndulo rotatorio conocido como péndulo Furuta, que consiste en un motor de eje vertical unido a un brazo de cuyo extremo cuelga la varilla del péndulo. Este prototipo es es un sistema subactuado de dos grados de libertad, ambos rotacionales llamados brazo y péndulo. El movimiento del brazo (primer grado de libertad) se realiza con un motor en un plano horizontal girando alrededor de un eje perpendicular al plano, mientras que el péndulo no tienen motor y se encuentra colocado en un extremo del brazo y su eje de giro es colineal al eje axial del brazo y su movimiento se realiza en un plano perpendicular al de este último [4].

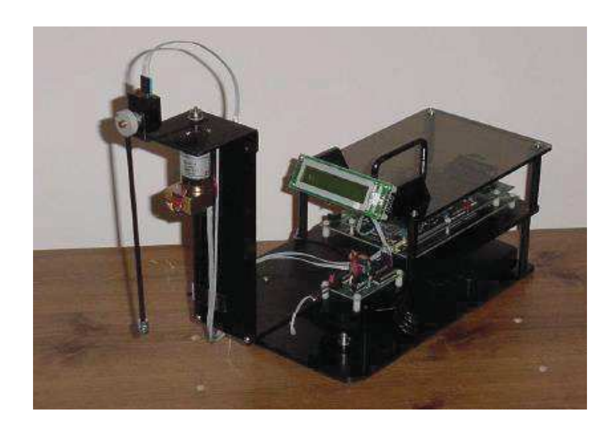


Figura 2. Péndulo Furuta.

Con esta configuración se evita el problema de final de carrera, aunque aparecen otros nuevos debido a que la dinámica del sistema, como son la fuerza centrífuga y de Coriolis [3], por lo que el problema de control del péndulo Furuta es llevar el péndulo desde cualquier posición y en particular desde la posición colgante natural, hasta la posición invertida, problema también conocido como *swing up.*

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Por otro lado este sistema presenta propiedades de no linealidad e inestabilidad, lo que hace que este problema se haya convertido en un modelo de referencia utilizado a lo largo de muchos años para probar varios métodos de control [4]. Por lo tanto el objetivo de este trabajo fue evaluar el control PD y *Tanh* en un péndulo Furuta mediante una plataforma de simulación.

2. Materiales y métodos

El prototipo empleado en esta investigación está basado en un equipo de la empresa Quanser®, el cual tiene la opción de ensamblar cuatro sistemas dinámicos: péndulo con carga de inercia, péndulo con rueda de reacción, pendubot y péndulo Furuta [7].

Las características del fabricante para el péndulo Furuta se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de los parámetros del péndulo Furuta.

Parámetro	Valor
Longitud del brazo	0.408 *m*
Longitud del péndulo	0.92 *m*
Longitud al centro de masas del péndulo	0.5 *m*
Masa del péndulo	0.55 *kg*
Inercia alrededor del brazo	1.2305 Nm^2
Inercia alrededor del péndulo	0.03 Nm^2
Viscosidad del brazo	2.3214 *N/ms*
Viscosidad del péndulo	2.2558 *N/ms*

Los parámetros presentados en la Tabla 1 son empleados para simular el comportamiento del péndulo Furuta. Para realizar la simulación de este prototipo mediante el control PD y *Tanh* se propusieron las siguientes etapas:

a) Obtención del modelo dinámico a través de las ecuaciones de Euler-Lagrange.
b) Propuesta del control mediante moldeo de energía.
c) Aplicación del control PD en el modelo dinámico del péndulo Furuta.
d) Control *Tanh* en el péndulo Furuta.

La simulación del modelo dinámico y el control PD y *Tanh* se realizó en el programa Matlab®.

2.1 Modelo dinámico del sistema

Un método ampliamente utilizado para obtener el modelo dinámico de un sistema es el método de Euler-Lagrange [2, 8], el cual utiliza la diferencia entre la energía cinética $K(q,\ \dot{q})$ y la energía potencial $u(q)$:

$$L(q,\dot{q}) = K(q,\dot{q}) - u(q) \tag{1}$$

En donde $L(q,\dot{q})$ es un término que se conoce como Lagrangiano, que depende de la posición (q) y velocidad $(\dot{q})$.

La energía cinética y la potencial pueden expresarse como una función lineal de sus parámetros dinámicos. La energía cinética es la suma de la energía de traslación más la energía de rotación [2]:

$$k(q,q) = \frac{1}{2}Iq^2 \tag{2}$$

La energía potencial puede describirse como [2]:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$u(q) = mgh. \tag{3}$$

Partiendo de la ecuación (1) y (2) para resolver la ecuación de Euler-Lagrange para un sistema conservativo[1], la ecuación se define como [2, 4]:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial(\dot{q})}\right] - \frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial(\dot{q})} = \tau - f(\tau,\dot{q}) \tag{4}$$

Donde q es un vector de coordenadas generalizadas, τ es un vector de fuerzas y pares aplicados y $f(\tau,\dot{q})$ es el vector de fricción.

Con base a la ecuación (4) se obtiene el modelo dinámico del robot manipulador para *n* grados de libertad [8]:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(g) + f(\tau,\dot{q}) + \tau_d = \tau \tag{5}$$

En donde $q,\ \dot{q},\ \ddot{q} \in \mathbb{R}^{nx1}$ y son el vector de posición, velocidad y aceleración articular del robot respectivamente, $M(q) \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de Inercias, $C(q,\ \dot{q}) \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de Coriolis y fuerza Centrípeta, $g(q) \in \mathbb{R}^{nx1}$ es el par gravitacional, $f(\tau,\ \dot{q}) \in \mathbb{R}^{nx1}$ es el vector de fricción, $\tau \in \mathbb{R}^{nx1}$ es el para aplicado y $\tau_d \in \mathbb{R}^{nx1}$ representa las perturbaciones externas.

Para el diseño de controladores se deben considerar las siguientes características del modelo dinámico de robots manipuladores [9]:

a) La Matriz de inercias $M(q) > 0$ es una matriz definida positiva, es simétrica $M(q) > 0 \Longrightarrow \exists\, M^{-1}(q) > 0$ y está acotada:

$$\mu_1(q)I \leq M(q) \leq \mu_2(q)I \tag{6}$$

Donde I es la matriz Identidad, $\mu_1(q) \neq 0\ y\ \mu_2(q)I$ es una constante escalar para la posición de una articulación. Esta función puede ser acotada por la siguiente expresión [9]:

$$0 \leq \frac{1}{\mu_2(q)} \leq M^{-1}(q) \leq \frac{1}{\mu_1(q)} I \tag{7}$$

b) La Matriz de Coriolis y fuerza centrípeta $C(q,\dot{q})$ es cuadrada y está acotada [10]:

$$\| C(q,\dot{q}) \| \leq \upsilon_b \| \dot{q} \|^2 \tag{8}$$

Donde $\upsilon_b(q)$ es un escalar constante, por lo que es posible realizar una factorización de $C(q,\dot{q})$ dada por la siguiente expresión:

$$C(q,\dot{q}) = C_m(q,\dot{q})\dot{q} \tag{9}$$

En donde C_m es una constante para satisfacer la siguiente propiedad:

$$\frac{1}{2}\dot{q}^T\ [M\,(q) - 2C(q,\dot{q})]\dot{q} \equiv 0 \tag{10}$$

Por lo que la matriz de Coriolis y fuerza Centrípeta puede escribirse de la siguiente forma:

$$C(q,\dot{q}) = \dot{M}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial q}[\dot{q}^T M(q)\dot{q}] \quad . \tag{11}$$

c) *El par gravitacional* para un robot con articulaciones rotacionales el par gravitacional está acotado de la siguiente forma [2]:

[1] Un sistema conservativo es aquel donde la energía se mantiene.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\| g(g) \| \leq g_b \tag{12}$$

Donde g_b es un escalar constante. El par gravitacional se puede calcular con el gradiente de la energía potencial del robot [2]:

$$g_b \frac{\partial U(q)}{\partial q} \tag{13}$$

d) El Vector de fricción $f(\tau, \dot{q})$ afecta la posición y velocidad del robot. La fricción puede representarse de manera general por la siguiente ecuación [11]:

$$f(\tau, \dot{q}) = F_v \dot{q} + F_s + F_c sgn(\dot{q}) \tag{14}$$

Donde F_v es la fricción viscosa, F_s la fricción estática, F_c es la fricción de Coulomb y sgn es la función signo.

La fuerza de fricción se considera como energía disipativa, lo que permite considerar los modelos tradicionales de fricción viscosa y fricción de Coulomb. En velocidades iguales a cero la fricción estática está presente, satisfaciendo la siguiente condición [11]:

$$f_i(0, \tau_i) = \tau_i - g_i(q) \tag{17}$$

Lo anterior para $-f_i \leq \tau_i - g_i \leq f_i$ siendo f_i el límite del par de fricción estática para la *i*-ésima articulación del sistema.

2.2 Propuesta del controlador mediante moldeo de energía

Existen diferentes estrategias de control con la finalidad de emplear la menor cantidad posible de recursos, esto con el fin de obtener la máxima respuesta en los sistemas. Una de estas estrategias de control para robots manipuladores es el moldeo de energía [2, 9].

El moldeo de energía es un método para el diseño de controladores, el cual considera el modelo dinámico (Ecuación 5) sin la existencia de perturbaciones externas [2].

Esta técnica considera variables de estado, por lo que es necesario encontrar el modelo en lazo cerrado. Las variables de estado se expresan tomando en cuenta el error de posición $\tilde{q} = qd - q$, en donde q es la posición que toma la articulación con respecto al tiempo y qd es la posición deseada. Dado que el propósito es realizar control de posición se tiene [4]:

$$\begin{array}{ll} X_1 = q_d - q & X_2 = \dot{q} \\ \dot{X}_1 = -\dot{q} & \dot{X}_2 = \ddot{q} \end{array} \tag{18}$$

Sustituyendo la aceleración ($\ddot{q}$) en el modelo dinámico:

$$\ddot{q} = M(q)^{-1}[\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) - f(\tau, q)] \tag{19}$$

Utilizando la Ecuación 19 el modelo se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1}[\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - g(q) - f(\tau, q)] \end{bmatrix} \tag{20}$$

El método del modelo de energía se aplica para proponer la estructura de control τ basándose en la siguiente familia de controladores:

$$\tau = \nabla u(k_p, \tilde{q}) - f_v(k_v, q) + g(q) + f(\tau, q) \tag{21}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En donde $\nabla u(k_p, \tilde{q})$ es la energía potencial artificial que depende de una ganancia proporcional $k_p \in \mathbb{R}^{nxn}$ y está definida de la siguiente forma:

$$u(k_p, \tilde{q}) = \frac{f(\tilde{q})^T K_p f(\tilde{q})}{2} \tag{22}$$

El término $f_v(k_v, q)$ es una función derivativa que depende de una ganancia derivativa $k_v \in \mathbb{R}^{nxn}$, tambien conocida como función de amortiguamiento. Esta función puede escribirse de la siguiente manera:

$$f_{v(k_v}, \dot{q}) = q^T f_v, \dot{q}) > 0; \tag{21}$$

Por lo que es posible escribir:

$$u(k_p, \tilde{q}) = K_p \tilde{q} \tag{22}$$
$$f_u(k_u, \tilde{q}) = K_u \dot{q} \tag{23}$$

Para continuar con el método se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\tilde{q} q) = \frac{1}{2} q^T M(q) \dot{q} + u(K_p, \tilde{q}) \tag{23}$$

El método de moldeo de energía trata de hallar una función candidata $u(K_p, \tilde{q})$ que cumpla con las siguientes condiciones de la función de Lyapunov:

$$V(0,0) = 0 \quad \forall \quad \tilde{q}\dot{q} = 0 \tag{24}$$
$$V(\tilde{q}, \dot{q}) > 0 \quad \forall \quad \tilde{q}\dot{q} \neq 0$$

Al derivar la función candidata de Lyapunov:

$$\dot{V}(\tilde{q}\dot{q}) = \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q} + \frac{\partial u(k_p, \tilde{q})^T}{\partial(\tilde{q})}\dot{q} \tag{25}$$

Evaluando la Ecuación 25 mediante las propiedades presentadas en la sección 2.1 se tiene que es una función semidefinida negativa $\dot{V}(\tilde{q}\dot{q}) \leq 0$ la cual indica un punto de equilibrio estable.

2.3 Control PD

El control PD presenta la siguiente estructura matemática [2]:

$$\tau = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} + g(q) + f(\dot{q}) \tag{26}$$

Considerando ausencia de fricción se tiene [11]:

$$\tau = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} + g(g) \tag{27}$$

Considerando la ecuación de modelo dinámico:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} \tag{28}$$

Una función candidata de Lyapunov para este controlador puede expresarse de la siguiente forma [9]:

$$V(\dot{q}, \tilde{q}) = \frac{\dot{q}^T M(q)\dot{q}}{2} + \frac{\tilde{q}^T k_P \tilde{q}}{2} \tag{29}$$

Derivando con respecto al tiempo $V(\dot{q}, \tilde{q})$:

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + \frac{\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q}}{2} + \tilde{q}^T K_p \dot{\tilde{q}} \tag{30}$$

Al sustituir $M(q)\ddot{q}$ de la ecuación de lazo cerrado (29) se obtiene:

$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = -\dot{q}^T K_u \dot{q}^T[\dot{M}(q) - 2C(q,\dot{q})]\dot{q} \tag{31}$$

Utilizando la propiedad $\frac{1}{2}\dot{q}^T[\dot{M}(q) - 2C(q,\dot{q})]\dot{q} \equiv 0$ se simplifica a:

$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = -\dot{q}^T K_u \dot{q} \leq 0 \tag{32}$$

Por lo que la función $\dot{V}(\dot{q},\tilde{q})$ es semidefinida negativa $\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) \leq 0$.

2.4 Control *Tanh*

El controlador de posición con compensación de gravedad denominado *Tanh* fue propuesto originalmente por Cai, L. y Song, G. y reformulado más tarde por Kelly, R., Santibanez, V. y Reyes, F. [2, 4], este controlador pertenece a la familia de los controladores saturados cuya característica es que convergen a cierta cota a medida que el argumento crece indefinidamente, estas funciones son radialmente acotadas. Este control considera la siguiente estructura de control [2]:

$$\tau = K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) - g(q) \tag{33}$$

Donde:

$$\tanh(\tilde{q}) = \begin{bmatrix} \tanh(\tilde{q}_1) \\ \tanh(\tilde{q}_2) \\ \vdots \\ \tanh(\tilde{q}_n) \end{bmatrix} \tag{34}$$

Sustituyendo la Ecuación 33, en la ecuación del modelo dinámico:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) \tag{35}$$

Por lo que la ecuación del sistema en lazo cerrado es:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1}[K_p \tanh(\tilde{q}) - K_v \tanh(\dot{q}) - C(q,\dot{q})\dot{q}] \end{bmatrix} \tag{36}$$

Una función candidata de Lyapunov es:

$$V(\dot{q},\tilde{q}) = \frac{\dot{q}^T M(q)\dot{q}}{2} + \begin{bmatrix} \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_1))} \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_2))} \\ \vdots \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_n))} \end{bmatrix}^T K_p \begin{bmatrix} \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_1))} \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_2))} \\ \vdots \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_n))} \end{bmatrix} \tag{37}$$

Al derivar la Ecuación 37 con respecto al tiempo se tiene:

$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = \dot{q}^T M(q)\ddot{q} + \frac{\dot{q}^T \dot{M}(q)\dot{q}}{2} + \begin{bmatrix} \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_1))} \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_2))} \\ \vdots \\ \sqrt{In(\cosh(\tilde{q}_n))} \end{bmatrix}^T \left[\frac{\tanh(\tilde{q})}{\sqrt{In(\cosh(\tilde{q}))}}\right]\dot{\tilde{q}} \tag{38}$$

En donde $\left[\frac{\tanh(\tilde{q})}{\sqrt{In(\cosh(\tilde{q}))}}\right] \in \mathbb{R}^{nxn}$ y $K_p \in \mathbb{R}^{nxn}$ y tiene la siguiente estructura:

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\left[\frac{\tanh(\tilde{q})}{\sqrt{ln(\cosh(\tilde{q}))}}\right] = \begin{bmatrix} \left[\frac{\tanh(\tilde{q}_1)}{\sqrt{ln(\cosh(\tilde{q}_1))}}\right] & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left[\frac{\tanh(\tilde{q}_2)}{\sqrt{ln(\cosh(\tilde{q}_2))}}\right] & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \left[\frac{\tanh(\tilde{q}_n)}{\sqrt{ln(\cosh(\tilde{q}_n))}}\right] \end{bmatrix} \quad (39)$$

Al sustituir $M(q)\ddot{q}$ en la ecuación de lazo cerrado se obtiene:

$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = -\dot{q}^T K_v \begin{bmatrix} \tanh(\dot{q}_1) \\ \tanh(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \tanh(\dot{q}_n) \end{bmatrix} + \frac{1}{2}\dot{q}^T[\dot{M}(q) - 2C(q,\dot{q})]\dot{q} \quad (40)$$

Aplicando la propiedad $g(q) = \frac{\partial u(q)}{\partial q}$ la ecuación 40 se simplifica a:

$$\dot{V}(\dot{q},\tilde{q}) = -\dot{q}^T K_v \begin{bmatrix} \tanh(\dot{q}_1) \\ \tanh(\dot{q}_2) \\ \vdots \\ \tanh(\dot{q}_n) \end{bmatrix} \leq 0 \quad (41)$$

Por lo que esta función es semidefinida negativa $V(\dot{q},\tilde{q}) \leq 0$

3. Resultados

3.1 Modelado del péndulo Furuta

El análisis de sistema se hizo mediante expresiones matemáticas que representan el sistema físico, con base en las leyes físicas y aplicando el método de Euler-Lagrange, con las cuales se encontraron las ecuaciones de movimiento [3, 4].

El análisis del péndulo Furuta se muestra a continuación [3, 4]:

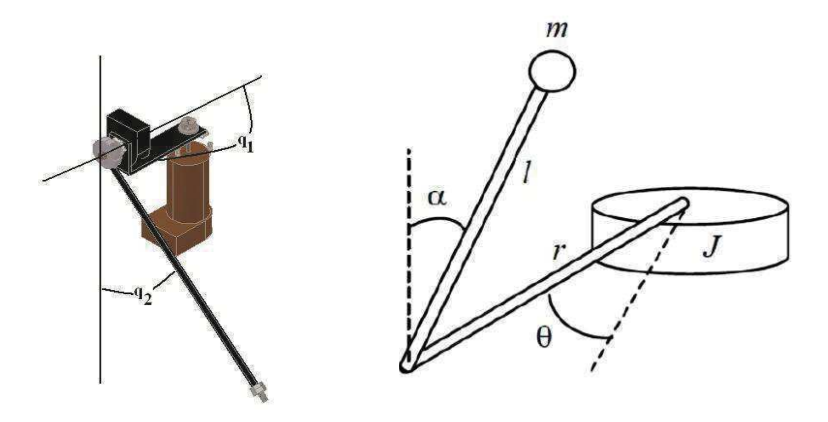


Figura 3. Análisis del péndulo Furuta

Considerando la Figura 3 se tiene que $r = \iota_1$ es la longitud del brazo, $l = \iota_2$ es la longitud del péndulo, $\theta = q_1$ y $\alpha = q_2$ describen los ángulos del brazo y péndulo respectivamente; m la masa del péndulo y J es la inercia del actuador [7]. En este trabajo no se consideró la fricción y las perturbaciones externas.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



El péndulo Furuta tiene en el brazo un giro alrededor de un eje perpendicular a la base, mientras que el péndulo se encuentra colocado en un extremo del brazo y su eje de giro es colineal al eje axial del brazo, realizando un giro en un plano perpendicular al brazo [12]. Por lo tanto la cinemática para el brazo se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \chi_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \iota_1 \cos q_1 \\ \iota_1 sin q_1 \\ -\iota_2 \end{pmatrix} \tag{42}$$

Bajo el mismo análisis la cinemática del péndulo es:

$$\begin{pmatrix} \chi_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \iota_1 \cos q_1 \\ \iota_1 sin q_1 \, cos q_2 + \iota_2 \sin q_2 \\ \iota_1 sin q_1 \, sin\iota q_2 - \iota_2 \cos q_2 \end{pmatrix} \tag{43}$$

Aplicando la Ecuación 4 para obtener la velocidad la velocidad de cada una de las posiciones se tiene:

$$\upsilon_1 = \begin{pmatrix} -\iota_{c1} \sin(q_1)\, \dot q_1 \\ \iota_{c1} \cos(q_1)\, \dot q_1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{44}$$

$$\upsilon_2 = \begin{pmatrix} \iota_{c1} sin(q_1) \dot q_1 \\ \iota_{c1} sin(q_1) \sin(q_2) \dot q_2 + \iota_{c1} cos(q_1) cos(q_2) \dot q_1 + \iota_{c2} \cos(q_2) \dot q_2 \\ \iota_{c1} sin(q_1) \cos(q_2) \dot q_2 + \iota_{c1} cos(q_1) sin(q_2) \dot q_1 + \iota_{c2} \sin(q_2) \dot q_2 \end{pmatrix} \tag{45}$$

Aplicando la Ecuación 2 para la energía cinética en el brazo y péndulo:

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 (l^2_{c1} \dot q^2_1) + \frac{1}{2} I_1 \dot q^2_1 \tag{46}$$

$$K_2 = [\frac{1}{2} m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + \frac{1}{2} m_2 l^2_1 cos^2(q_1) + \frac{1}{2} I_2] \dot q^2_1 + [\frac{1}{2} m_2 l^2_{c2} + \frac{1}{2} m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + \frac{1}{2} I_2] \dot q^2_2 + [m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + I_2] \dot q_1 \dot q_2 \tag{47}$$

Aplicando la Ecuación 3 para la energía potencial en ambas articulaciones:

$$u_2 = 0 \tag{48}$$

$$u_2 = -m_2 l_2 g \sin(q_2) \tag{49}$$

Aplicando la Ecuación 1 para obtener el Lagrangiano total a partir de la Ecuación 46, 47, 48 y 49 se tiene:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m_1 (l^2_{c1} \dot q^2_1) + \frac{1}{2} I_1 \dot q^2_1 + [\frac{1}{2} m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + \frac{1}{2} I_2] \dot q^2_1 + [\frac{1}{2} m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + \frac{1}{2} I_2] \dot q^2_1 + [m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + l_2] \dot q_1 \dot q_2 + m_2 l_2 g cos(q_2) \tag{50}$$

Empleando la Ecuación 61 para sustituirla en la Ecuación 4 se tiene:

$$\tau = [m_1 l_{c1} + m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + I_1 + I_2] \ddot q_1 + [m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + l_2] \ddot q_2 + d_0 \tag{51}$$

$$0 = [m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + l_2] \ddot q_1 + [m_2 l^2_{c2} + m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + l_2] \ddot q_2 + m_2 l_{c2} g \sin(q_2) + d_1 \tag{52}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En donde l_{c1} y l_{c2} es el centro de masa del brazo y péndulo respectivamente, d_0 y d_1 es la viscosidad de cada articulación.

En la Ecuación 63 se observa que no se tiene τ, ya que la segunda articulación no tiene un motor. Finalmente tenemos la estructura del modelo dinámico:

$$M(q) = \begin{pmatrix} m_1 l_{c1} + m_2 l^2{}_{c1} sin^2(q_1) + I_1 + I_2 & m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + l_2 \\ m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_1) + l_2 & m_2 l^2{}_{c2} + m_2 l^2_{c1} sin^2(q_1) + l_2 \end{pmatrix} \tag{53}$$

$$C(q,\dot{q}) = \begin{pmatrix} m_2 l^2{}_{c2} \sin(q_2)\, \dot{q}_2 + d_0 & m_2 l^2{}_{c2} \sin(q_2) \cos(q_2)\, \dot{q}_1 - m_1 l_1 l_{c2} \sin(q_2)\, \dot{q}_2 \\ -m_1 l^2{}_{c1} \sin(q_2) \cos(q_2)\, \dot{q}_1 & d_1 \end{pmatrix} \tag{54}$$

$$G(q) = \begin{pmatrix} 0 \\ -m_2 l_{c2} g sin(q_2) \end{pmatrix} \tag{55}$$

3.2 Simulación del modelo dinámico del péndulo Furuta.

La simulación del modelo dinámico del péndulo Furuta se realizó en el programa Matlab®, se programaron las ecuaciones en código .m, al cual se agregaron las Ecuaciones que corresponden al control PD y *Tanh*. Para dar solución al modelo se utilizó el método de integración Runge-Kutta 4/5 mediante la función "ode45" de Matlab®. Los resultados obtenidos por la plataforma de simulación se muestran en las Figuras 4 y 5 la posición y velocidad del brazo respectivamente y en la Figura 6 y 7 se presenta la posición y velocidad del péndulo.

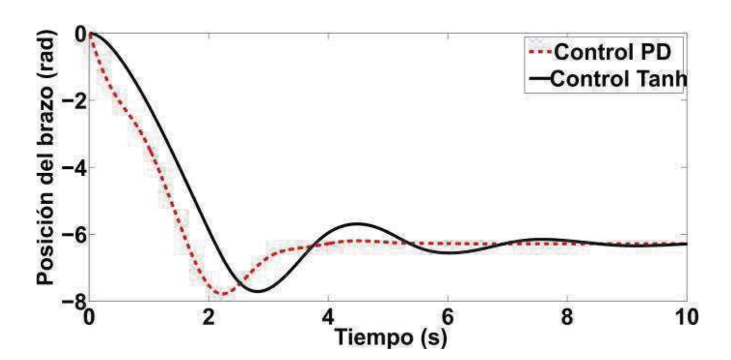


Figura 4. Posición del brazo.

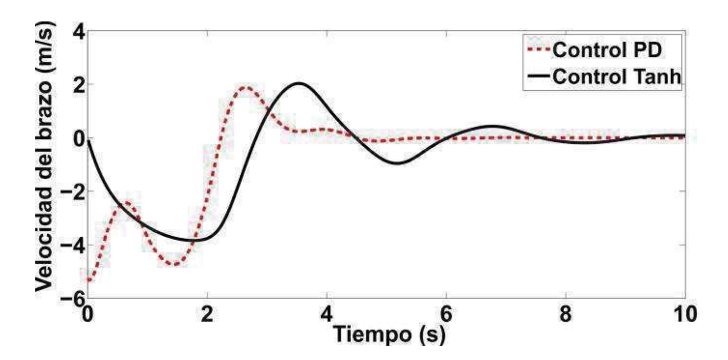


Figura 5. Velocidad del brazo.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 38, pp. 481-492.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



La posición y velocidad del brazo indican que el control PD fue el que hizo que se estabilizara más rápido esta articulación con respecto al control *Tanh*. Sin embargo el objetivo de este tipo de sistemas es llevar al péndulo a una posición vertical, sin importar la posición del brazo. Con base a esto último se puede observar en la Figura 6 que la posición del péndulo utilizando el control *Tanh* fue más estable y llego a la posición deseada en un tiempo similar al del control PD, pero sin presentar oscilaciones prolongadas. Resultado simular se observa en la velocidad del péndulo (Figura 7). Por lo que de forma cualitativa las figuras indican que es recomendable utilizar el control *Tanh*.

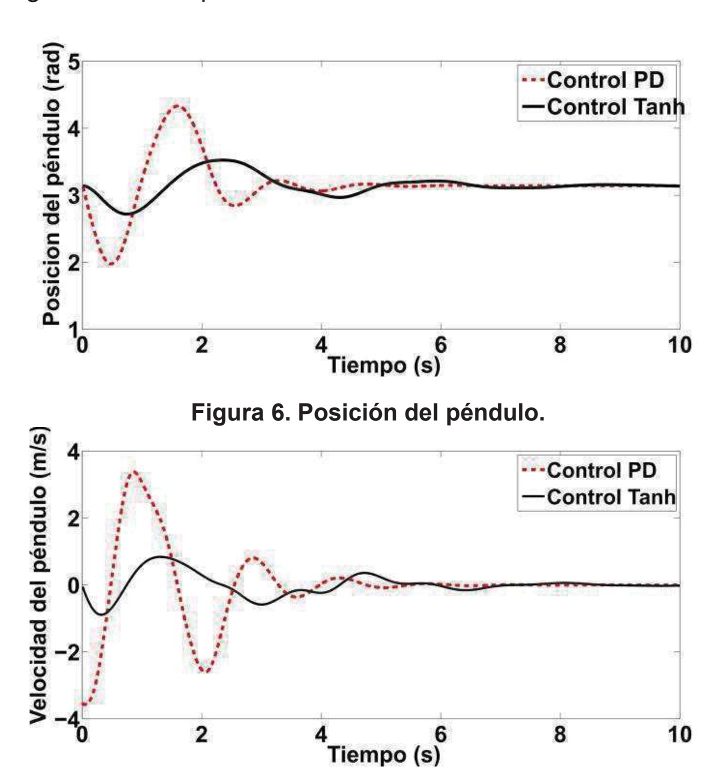


Figura 6. Posición del péndulo.

Figura 7. Velocidad del péndulo.

Para determinar de forma cuantitativa que controlar es recomendable para el péndulo Furuta, se midió el error de posición mediante el índice de desempeño con la norma L^2, la cual considera el error de posición ($\tilde{q}$) y se calcula con la Ecuación 56.

$$L^2 = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \|\tilde{q}\| dt} \tag{56}$$

En donde T es el intervalo de evaluación de los datos.

Los resultados al aplicar el controlador se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Desempeño de los controladores.

Índice de desempeño	PD	*Tanh*
L^2	0.246	0.235



De acuerdo a la Tabla 2, se observa que el que presentó una menor suma de todo los errores fue el controlador *Tanh*, por lo que de forma cualitativa y cuantitativa se recomienda este controlador para este tipo de péndulos.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó la simulación del péndulo en configuración Furuta mediante la aplicación de un control PD y el *Tanh*. Se demostró que estas estructuras de control son estables en sentido de Lyapunov, lo cual permitió que fueran candidatas para realizar la simulación.

La obtención del modelo matemático permitió representar el comportamiento del péndulo Furuta, el cual en conjunto con las dos estructuras de control propuestas hicieron posible determinar la posición y velocidad de cada una de las articulaciones del prototipo.

Los resultados de la simulacion indicaron que el control *Tanh* es el que permitió llevar al péndulo a una posición vertical de forma más estable, con menos oscilaciones y con una menor velocidad. Lo anterior se pudo afirmar al obtener el índice de desempeño de cada controlador. Por lo que para efectos de control se recomienda el control *Tanh* para el péndulo Furuta.

5. Bibliografía

[1] López Ramírez P., Andrade Sosa H. "Aprendizaje con robótica, algunas experiencias", Editoral Educación 37 (1), 2013.
[2] Reyes Cortés F. “Robótica-Control de robots manipuladores”, Ed. Alfaomega Grupo Editor, 2011.
[3] Valera A., Vallés M., Cardo M. “Desarrollo y control de un péndulo de Furuta”. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
[4] Mancilla Morales J. A. "Modelado y evaluación de un péndulo en configuración Furuta haciendo uso de una plataforma gráfica". Tesis de licenciatura. FCE, BUAP. 166 p, Puebla, México, 2009.
[5] Aracil J., Gordillo F. "El péndulo invertido: un desafío para el control no lineal." Revista Iberoamericana de automática e informática industrial 2 (2), 8-19 pp, 2010.
[6] Aracil J., Gordillo F. “El péndulo invertido: un desafío para el control nolineal”, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2005.
[7] QUANSER. “Consulting Inc.Mechatronics control kit,Mechatronic Systems, Incorporated”, Manual del fabricante, 2002
[8] Cruz Ardila J., Ramírez Escarpeta J. "Modelo matemático y herramienta de simulación de exoesqueleto activo de cinco segmentos", Revista Científica Guillermo de Ockham 10 (2), 2012.
[9] Cebada Reyes J., Tuxpan Meneses J., Sánchez Sánchez P., Michua Camarillo A., Mancilla Morales J. A. "Evaluación de 4 Estructuras de Control Mediante un Simulador Basado en un Robot de 2 Grados de Libertad", 8º Congreso Nacional de Mecatrónica. Veracruz, México, 220-224 pp, 2009.
[10] Tepal Nieto O, Félix Beltrán O., Reyes Cortés F. “Implementación de algoritmos de control en un péndulo de transmisión directa”, Tesis de maestria. FCE, BUAP. 143 p., Puebla, México, 2016.
[11] Mancilla Morales J. A. "Estudio de los problemas de fricción de robots manipuladores". Tesis de maestria. FCE, BUAP. 172 p., Puebla, México, 2011.
[12] Garcia Giovanni T., Buitrago Molina J., Ramírez J. "Control de un péndulo de Furuta, una revisión del estado del arte." Scientia et technica 20 (4), 322-330 pp, 2015.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 493-506.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Interfaz de Interacción Asistida para Personas con Discapacidad Visual

Bernal Moreira Guillermo Enrique, Pérez García Gabriel Ricardo, Constantine Castro Alisson Asunción y Valarezo Plaza Stephany Solange

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo Velasco, Km. 30.5 Vía Perimetral
Guayaquil, Ecuador

Resumen

Las personas con discapacidad visual demuestran dificultad para adquirir habilidades interpersonales debido a que la comunicación está basada en gran parte, de señales no verbales que ellos desconocen, dando lugar a que las personas invidentes desarrollan a largo plazo aislamiento, dependencia, pasividad entre otras dificultades. En este artículo se teoriza un modelo de interacción social presente en invidentes o personas con visión reducida, se propone una interfaz para la correcta aplicación del modelo y se detalla el trabajo de una primera implementación que utiliza un asistente personal inteligente (IPA), Machine Learning con Deep Learning y Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR) asistido por procesamiento digital de imágenes con el objetivo de brindar información extra del entorno en el que se encuentra interactuando la persona con discapacidad visual.

Palabras clave: interacción social, discapacidad visual, asistente personal inteligente, machine learning.

1. Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) la cifra estimada de personas con discapacidad visual es de 253 millones de las cuales 36 millones pertenecen al grupo de personas invidentes y 217 millones tienen discapacidad visual moderada a grave [1]. Numerosos estudios ponen en evidencia que el desarrollo social de las personas ciegas y deficientes visuales es diferente al de las personas sin discapacidad [2], debido a la ausencia o limitación de la modalidad sensorial visual que es la responsable de transmitir más del 85% de las información que las personas reciben [3].

Si bien la interacción social es un proceso de comunicación, y un factor fundamental en el proceso de integración a la sociedad, tanto en el ámbito social, económico, educativo y cultural [4], los modelos convencionales de interacción social muestran dificultades cuando los actores involucrados son personas que presentan cualquier grado de discapacidad visual ya que éstos modelos se apoyan de percepciones y observaciones.

Históricamente, las personas con discapacidad visual han usado métodos creativos para compensar la falta de información visual en sus vidas diarias, por ejemplo, el entrenamiento en el uso del bastón blanco que los ayuda a navegar con éxito o usar el sentido del oído más efectivamente, o en el uso del tacto, para desarrollar medios de comunicación y acceso a información, como el sistema Braille. Sin embargo, con el desarrollo de las tecnologías de asistencia, se han creado nuevas formas y modelos de comunicación[5], por ejemplo la creación de aplicaciones móviles para personas ciegas. Algunas de ellas son parte de los servicios de accesibilidad de los sistemas operativos que incluyen:

a) Lectores de pantalla que le permiten al usuario saber lo que ocurre en la pantalla táctil por medio de un sintetizador de voz.
b) Lectores de emails, páginas web y libros.



c) Asistentes inteligentes que trabajan como calendario, hacen llamadas telefónicas o permiten configurar otras aplicaciones.
d) Convertidores de voz a texto

Otras aplicaciones pueden ser instaladas por el usuario que brindan servicios de asistencia para:
a) Proporcionar ayuda en la navegación del usuario por las calles de la ciudad.
b) Leer placas y vallas publicitarias por OCR.
c) Llamar taxis o servicios de emergencia.

Muchas de las tareas que se realizan diariamente como buscar una dirección, enviar mensajes o hacer una cita, pueden ser realizadas a través de comandos de voz, es decir, a través de una comunicación bidireccional en donde existen un emisor y un receptor.

Las tecnologías de asistencia son definidas como cualquier producto, pieza de equipo o sistema que es usado para incrementar, mantener o mejorar las capacidades funcionales de individuos con discapacidades [6]. Para las personas con discapacidad visual, a estas tecnologías asistivas también se las denominan como recursos tiflológicos. En la actualidad se han ido desarrollando en hardware y software, tales como JAWS, software que convierte el texto en pantalla en sonido, y WinBraille, que permite adaptar el teclado convencional de una computadora para escribir en Braille.

En esta investigación se teoriza un modelo para personas con discapacidad visual el cual busca facilitar y mejorar la interacción social en personas invidentes o con visión reducida, aumentando la cantidad de información que poseen sobre el entorno basado en soluciones ya existentes. Se define un framework, llamado Heimdall, que incluye varios componentes que estructuran un actor específico y esencial del modelo.

2. Análisis previo

El desarrollo social de las personas invidentes se comporta de manera diferente ante las personas que presentan otro tipo de discapacidad [7]. Investigaciones de los años setenta muestran que existe un pobre funcionamiento social en niños con deficiencia visual. Apareciendo un déficit en habilidades verbales y no verbales de interacción social [8] y debido a ésto las habilidades de asertividad se muestran pasivas o agresivas en sus interacciones [9].

2.1 Influencia de la deficiencia visual en el aprendizaje

Las habilidades sociales no son rasgos que provienen de la personalidad; se adquieren a través del aprendizaje, la observación y modelado de otras personas y de la interacción con estas, de forma natural. Por esto las personas con deficiencia visual poseen un déficit temprano en habilidades sociales. La falta de visión impone restricciones en este proceso de aprendizaje, ya que estas destrezas sociales se componen de una cantidad y variedad de conductas no verbales.

Existe un vocabulario expresivo que apoya, sustituye y a veces contradice los mensajes verbales, y forma una parte importante de la interacción y para cuyo aprendizaje es necesario el sentido de la vista [10]. La ausencia o limitación de observación de estos comportamientos, afecta el aprendizaje y desarrollo de otras capacidades necesarias para llevar a cabo interacciones sociales y la capacidad de tomar perspectiva social. A través de estas conductas se infiere muchos de los estados emocionales de las personas con quienes nos relacionamos y se tiene la capacidad de identificar dichos sentimientos. Es por ésto que el aprendizaje de las personas con deficiencias visuales se lleva a cabo a través de la retroalimentación. Aunque usualmente la retroalimentación que se recibe es inexacta y distorsionada, ya que muchas personas videntes no poseen la habilidad de realizarlo sin la utilización de conductas no verbales.

Una parte del feedback se lo hace de manera no verbal, es por esto que con un solo gesto se sabe que cosas gustan o disgustan a los demás y cuándo es preciso cambiar de conducta, mientras

ISBN: 978-607-9394-14-1.



que las personas no videntes pierden aspectos sutiles de estas manifestaciones. Como consecuencia de las actitudes tomadas por las demás personas y las características del feedback, este método no es fiable para el aprendizaje y no proporciona información relevante que permita mejorar las habilidades sociales; incluso lleva a la persona a realizar una evaluación errónea de lo que pasa a su alrededor, interfiriendo en el desarrollo, aprendizaje y roles sociales [11].

Se ha comprobado que las personas con deficiencia visual tienen menos experiencias sociales y como consecuencia, menos oportunidades para aprender y ensayar sus repertorios de habilidades [12]. Por este contacto social reducido se encuentran con falta de motivación para moverse y explorar debido a la falta de ambientes estimulantes [13].

2.2 Requerimientos esenciales en la interacción social para personas con discapacidad visual

En base a estudios previos y a investigaciones realizadas por los autores por medio de entrevistas con personas con discapacidad visual, se encontró que las personas invidentes o con visión reducida quisieran [14]:

- Saber las identidades, expresiones faciales y gestos corporales de las personas con las que se comunican.
- Conocer la apariencia física de las personas, y los cambios de las mismas desde la última vez que los vieron.
- Saber cómo son percibidos los gestos y ademanes que ellos realizan mientras se encuentran dialogando con otra persona.

Sabiendo ésto, se realiza un modelo de asistente virtual portátil que se detalla en las siguientes secciones.

3. Modelo de desarrollo

Este modelo consta de tres fases: recepción, interpretación y emisión. Varios modelos sugieren una intervención de un tercer actor durante la comunicación. Dicho actor debe ser un medio que ayude a la persona no vidente a conectarse con su entorno como el bastón guía que permite el reconocimiento del entorno por el que transita la persona invidente.

3.1 Modelo de interacción.

Se plantea un modelo que busca facilitar una buena interacción social en personas invidentes o de visión reducida aumentando la cantidad de información que poseen sobre el entorno y la contraparte de la interacción. El modelo debe garantizar: descubribilidad, fácil aprendizaje, corto tiempo de respuesta y retroalimentación continua. El tercer actor, al que se llamó Heimdall, se encuentra comunicado con la persona invidente y receptando información del entorno, como se muestra en la figura 1.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



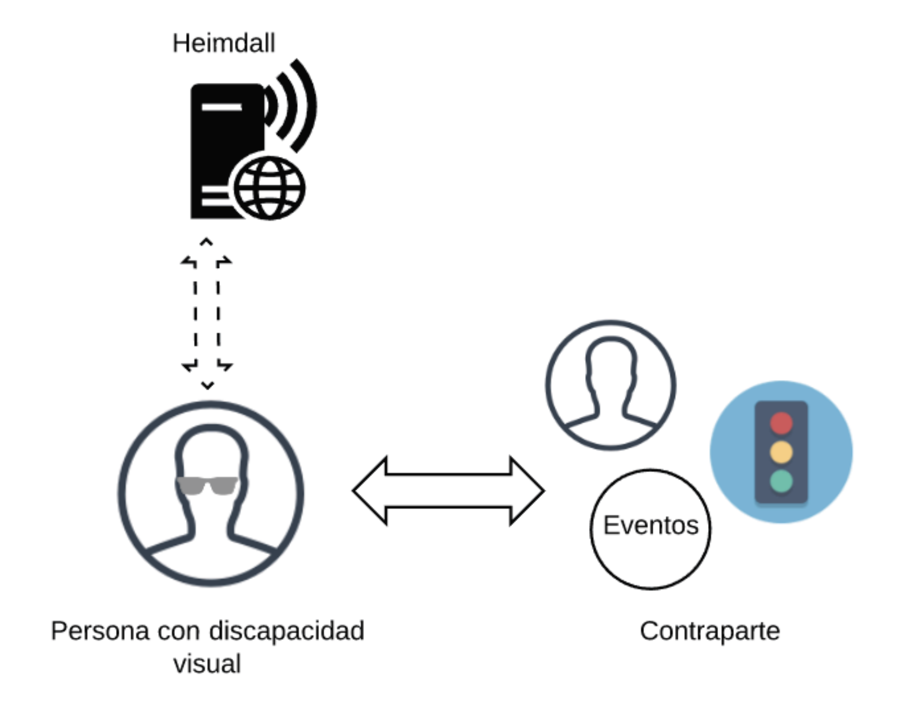


Figura 1. El modelo interactivo

Se define un "usuario" el cual representa a la persona invidente o con visión reducida, una "contraparte" la cual puede representar una persona, un objeto o un evento en específico que se encuentre en desarrollo y "Heimdall". El usuario interactúa directamente con una contraparte, por ejemplo el usuario conversa con una persona, si el usuario quiere evitar un obstáculo debe conocer dónde se encuentra, o si el usuario quiere cruzar una calle con semáforo debe interactuar con el evento de cambio de luces que está sucediendo ese preciso momento.

En estos escenarios el usuario se vale de herramientas que le facilitan la interacción. En el caso de conversar con una persona el usuario busca mirar hacia la persona y lo hace guiándose auditivamente, encontrando la fuente del sonido y mirando hacia ella, lo realiza para brindar una retroalimentación a la contraparte de donde se está recibiendo el mensaje. En el caso de evitar un obstáculo, comúnmente se utiliza un bastón de guía o un lazarillo. Para los eventos existen distintas herramientas se usarían para el escenario planteado.

La presencia de un tercer actor ayudará a mejorar el estilo de vida de la persona no vidente, puesto que servirá de asistencia valiéndonos del procesamiento de imágenes para la distinción de obstáculos y detección de rostros y tipos de texto.

3.2 Framework Heimdall.

Para éste tercer actor, se propone un sistema con tres capas que cumplirán a cabalidad el modelo, las capas presentes son: asistencia, procesamiento y una última de salida como se muestra en la figura 2.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 493-506.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



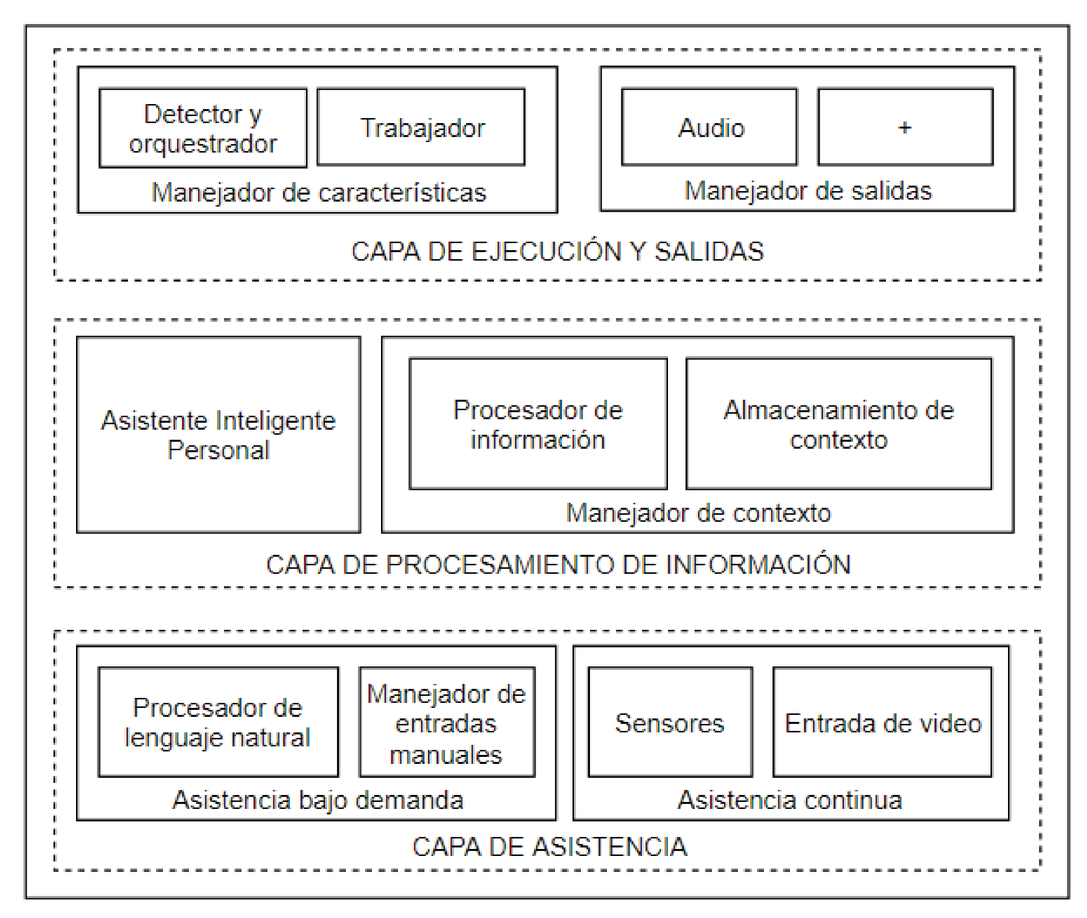


Figura 2. El framework

3.2.1 Capa de asistencia

El punto inicial de la interacción puede provenir de distintas fuentes. Se puede dar que el usuario se encuentre en la necesidad de saber si alguna persona conocida se encuentra en frente suyo, en ese caso el usuario iniciaría una acción manual, de igual manera si presenta la necesidad de realizar una lectura ya sea de un documento o de un cartel. Sin embargo, existen escenarios para los cuales el inicio de la interacción resultaría mejor si se realiza de manera automática. La detección de obstáculos es un ejemplo de este tipo de interacción, el usuario no debe tener que preguntar por si un obstáculo se encuentra en su camino. (Existen situaciones que se definirán como complejas donde es posible que la interacción se torne de ambas maneras, por ejemplo la espera de un semáforo en rojo para cruzar una calle).

Se plantean dos tipos de asistencias, la asistencia continua y la asistencia bajo demanda. La asistencia continua busca alertar previamente a la persona sobre información relevante de su entorno, este tipo de información puede comprender datos medidos con sensores o una entrada de video pre-procesada en la cual se detecta un obstáculo presente o se encuentra la presencia de una persona conocida.

Para la asistencia bajo demanda se establece un procesador de lenguaje natural, encargado de comprender el lenguaje humano y se dispone de entradas manuales, estableciendo una guía para que el usuario pueda ejecutar las diferentes acciones de asistencia bajo demanda. El procesador de lenguaje natural envía lo comprendido del lenguaje humano al asistente personal inteligente, descrito más adelante. Las entradas manuales contienen por sí mismas infinitas posibilidades, por ejemplo una entrada manual permite activar la lectura de un documento, activar la consulta de las personas que se

ISBN: 978-607-9394-14-1.



encuentra a su alrededor o simplemente dar apertura al procesador de lenguaje natural a comprender un requerimiento dado en lengua natural.

3.2.2 Capa de procesamiento de información

Definimos contexto como la información actual de la acción desarrollada o culminada que permite la fácil intuición de las acciones posibles a ser realizadas, dicha intuición es delegada al asistente personal inteligente.

En este nivel la información del usuario ya ha sido pre-procesada por la capa de asistencia. La información relevante del entorno ya ha sido registrada, en caso de requerir información extra del entorno que no se haya provisto inicialmente, los elementos de esta capa podrán solicitar a la capa de asistencia por información extra, relevante al contexto.

En ésta capa el asistente personal inteligente es el encargado de comprender la información recibida por la capa de asistencia, se prevé que el asistente personal entienda el contexto de la situación y dependiendo de esto escoja las acciones correctas a realizar. Es decisión del asistente personal inteligente la modificación del contexto. El asistente personal tiene la potestad de solicitar nueva información del entorno (alguna cuña de audio, una captura de imagen, un valor de sensor) mediante el procesador de información, esto con el fin de transmitir la información necesaria a la siguiente capa.

3.2.3 Capa de ejecución y salidas

La retroalimentación por parte del tercer actor es la encargada de que mejore y no se deteriore la calidad de la interacción social, ya que al solicitar asistencia (ya sea manual o por asistencia continua) se espera recibir una retroalimentación, el no recibir alguna conlleva a una comunicación como las descritas en el análisis previo, con distorsión debido a que no existe un contexto correcto de la situación, e inclusive la pertinente espera de la retroalimentación ocasiona un retardo en la interacción. Por ende es esencial que la información sea procesada al momento de recibirla. Un simple aviso de “Se acerca Andrea y parece estar enojada.” permite a la persona mostrar una reacción emocional con antelación y favorecer el envío correcto del mensaje implícito por parte del usuario. Por ello en esta capa existe un administrador de salidas, responsable de que el mensaje de retorno se envíe correctamente. Llamamos salida al medio por el cual el mensaje resultado es dirigido al usuario.

El audio puede considerarse como una salida, puesto que se puede aprovechar para retornar al usuario un mensaje por comandos de voz sobre el entorno. Un mensaje auditivo es considerado como un canal intrusivo y disruptivo (se recomienda conductividad ósea la cual puede considerarse menos intrusiva, sin embargo sigue existiendo una interrupción en la cual se presta la atención requerida para comprender el audio por parte del usuario) por lo tanto, este mensaje deberá ser conciso. Es esencial que sólo se use cuando la información enviada requiere atención imperativa. Casos de información que requerirían atención imperativa incluyen la notificación de obstáculos alrededor de la persona [14].

Esta capa contiene también un administrador de características que se compone de un detector, un orquestador, y un trabajador. El detector de características es el encargado de percibir nuevas funcionalidades y de exponerlas por medio del administrador de características. Así mismo el orquestador es el que se encarga de manejar las tareas recibidas y mantener una armonía en la ejecución de las mismas, permitiendo tener un posible paralelismo de instrucciones. Las tareas son ejecutadas por el trabajador, en el área de trabajo se plantea un solo trabajador pero estos pueden aumentarse dependiendo de las necesidades y la cantidad de características adquiridas.

El trabajador puede funcionar de dos maneras:

- Como ejecutor de proceso, recibe la instrucción, la información y realiza los trabajos necesarios para lograr una salida.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



- Delegando la salida a un proceso externo al área de trabajo (y muy posiblemente del sistema) permitiendo así la inclusión de otras herramientas dentro del mismo framework.

Se deja abierta a decisión de la implementación el agregar otro tipo de salidas, la cual se representa como un componente con el signo "+" en la figura 2. Una integración con IoT (Internet de las Cosas) en el cual una salida permite el control de dispositivos o sea la generación de una alarma enviada a alguna otra persona indicando el estado del usuario.

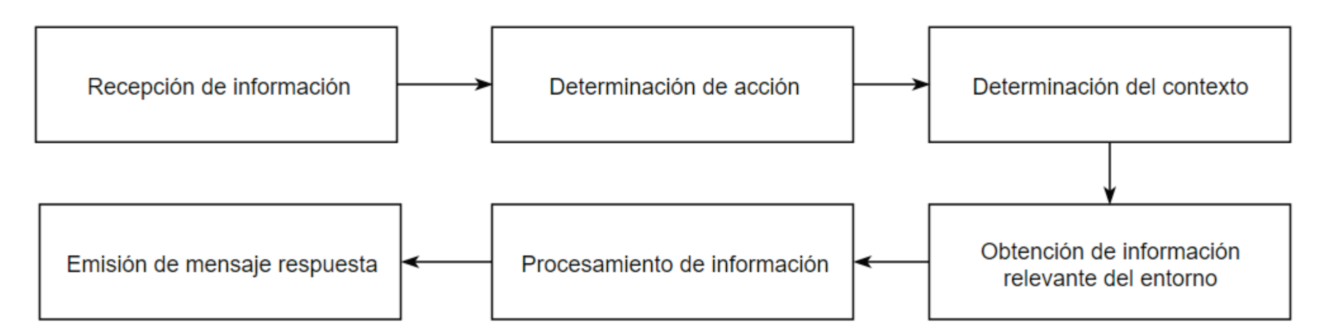


Figura 3. Proceso general recurrente en el framework.

En la figura 3 se describe el proceso general recurrente del framework, es imperativo que cada recepción de información desemboque en una emisión de mensaje respuesta con el fin de garantizar la retroalimentación al usuario y favorecer la interacción directa. La información ingresada puede ser nuevamente contrastada con información instantánea del entorno, por ejemplo al solicitar leer un documento es necesario obtener información del entorno (una captura del documento) para realizar la petición.

4. Implementación

En esta primera implementación del sistema se tuvo en cuenta que el prototipo debe ser discreto, liviano y compacto para que su uso no interfiera con las actividades diarias de los usuarios, se diseñó un prototipo con forma de gafas, conectado con una caja de procesamiento que se utiliza en forma de brazalete.

Las siguientes secciones muestran en detalle el hardware y software utilizado para el desarrollo del prototipo.

4.1 Diseño

El diseño del prototipo se asemeja a un accesorio que el usuario pueda utilizarlo en su vida cotidiana. Los componentes que se utilizan están distribuidos de tal forma que ninguno interfiera con el usuario. Se realiza el diseño en 3D, tomando en cuenta los detalles del modelo a cumplir para que sea cómoda y óptima.

4.1.1 **Gafas**

Se decidió montar en las gafas una cámara, en conjunto con un pequeño micrófono y audífono, de ésta forma los mismos no interfieren con las actividades diarias del usuario. El fin de realizar el diseño 3d de las gafas, es el de permitir que las mismas se acoplen al rostro de la persona que las utilizará.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 4. Diseño de las gafas, vista frontal.

El micrófono y audífono se ubicaron en la varilla izquierda de las gafas. La función del audífono es transmitir al usuario la información de interés que Heimdall devuelve. Este es el principal elemento de la capa de ejecución y salidas. Por otra parte, el micrófono es el componente esencial de la capa de asistencia y sirve para tomar los comandos de voz que la persona desee que Heimdall realice.

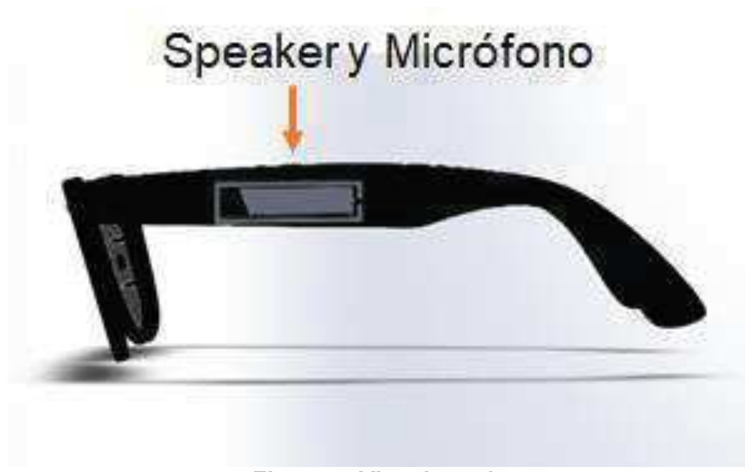


Figura 5. Vista lateral.

La ubicación de la cámara, como se observa en la figura 6 ha sido tomada basándose en la ubicación de los ojos de las personas y poniéndola en un centro fijo. Esto proporciona la naturalidad de expresiones al momento de fijar un objetivo a ser leído o reconocido, mejorando los gestos e interacción.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 493-506.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



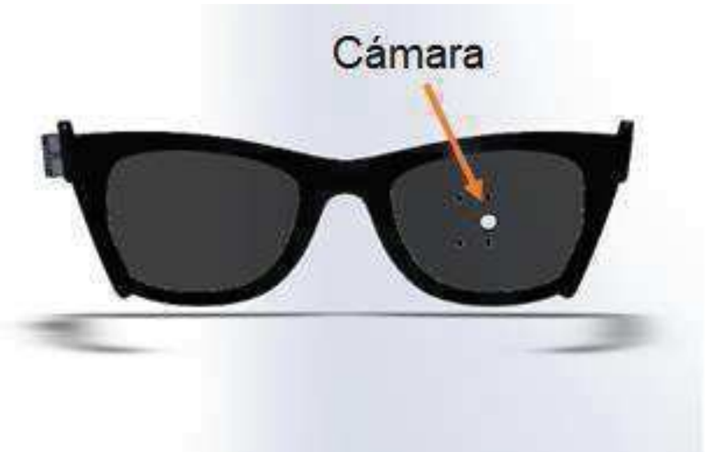


Figura 6. Vista trasera.

La cámara es otro componente de la capa de asistencia. Sin embargo, también forma parte de la capa de procesamiento de la información, debido a que, existe la realimentación del entorno; un ejemplo clave es la lectura de un libro. La cámara utilizada para éste primer prototipo es una RaspiCam de 5 megapíxeles, de 25x24x9mm con un sensor de resolución de 2592 x 1944 píxeles.

4.1.2 Brazalete

La función principal del brazalete es el soporte de la unidad de procesamiento de Heimdall, que para éste caso se ha utilizado una Raspberry Pi 3, con un procesador ARM Quad-Core 1,2 GHz, 1 GB RAM, con conectividad inalámbrica integrada de 802.11 b/g/n LAN y Bluetooth, adaptándose así a las especificaciones del proyecto.



Figura 7. Vista frontal y posterior del brazalete

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Puede ser utilizado con cualquiera de sus dos caras como se muestra en la figura 7, según el criterio del usuario. En su primera versión en la agarradera se utiliza velcro de ésta forma puede ser ajustado a medida.

4.2 Desarrollo

Se describe la implementación de acuerdo a sus características como prototipo y se destacan las partes correspondientes al framework.

4.2.1 Asistente Personal

Heimdall como asistente personal, funciona por medio del micrófono y audífono, realizando las acciones que el usuario desee por medio de comandos de voz, ya sea para saber el clima, la hora, entre otras, ésto lo realiza por medio de una conexión a internet, los comandos de voz son convertidos a texto, y luego son buscados en internet. Este asistente está asociado con *Dialogflow* lo que hace que la comunicación hombre-máquina se base en conversaciones en lenguaje natural. La información empieza por un comando de voz dado en lenguaje natural, el cual es procesado por la herramienta y generando tres cosas importantes: contexto, acción y posible respuesta inmediata. El contexto generado es utilizado para la toma de decisión en cuanto a la realización de las acciones. Se han definido dos acciones que se detallan a continuación.

4.2.2 Detección de Rostros

Para el reconocimiento facial, después de que el usuario ejecute el comando predeterminado para esta acción, Heimdall activa la cámara durante 3 segundos y se toman 3 frames, y estos son verificados mediante deep learning y una base de datos de rostros guardadas por el usuario. De los resultados se escoge aquel que tiene mayor precisión, en el caso que la imagen corresponda a alguna persona conocida, Heimdall envía una respuesta auditiva. Se incluyó para la base de datos un sistema basado en archivos, se crearon tres registros por individuo, donde se obtuvo una precisión promedio del 98% sobre los nuevos individuos en las pruebas realizadas al modelo pre entrenado fue obtenido de la comunidad.



Figura 8. Prueba de detección de rostros conocidos.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 493-506.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Durante el desarrollo se incluyeron como individuos de prueba a los autores del artículo, podemos distinguir a Stephany Valarezo (La Trece) y a Guillermo Bernal en la figura 8 realizando pruebas de la detección de rostros ante distintas expresiones faciales.

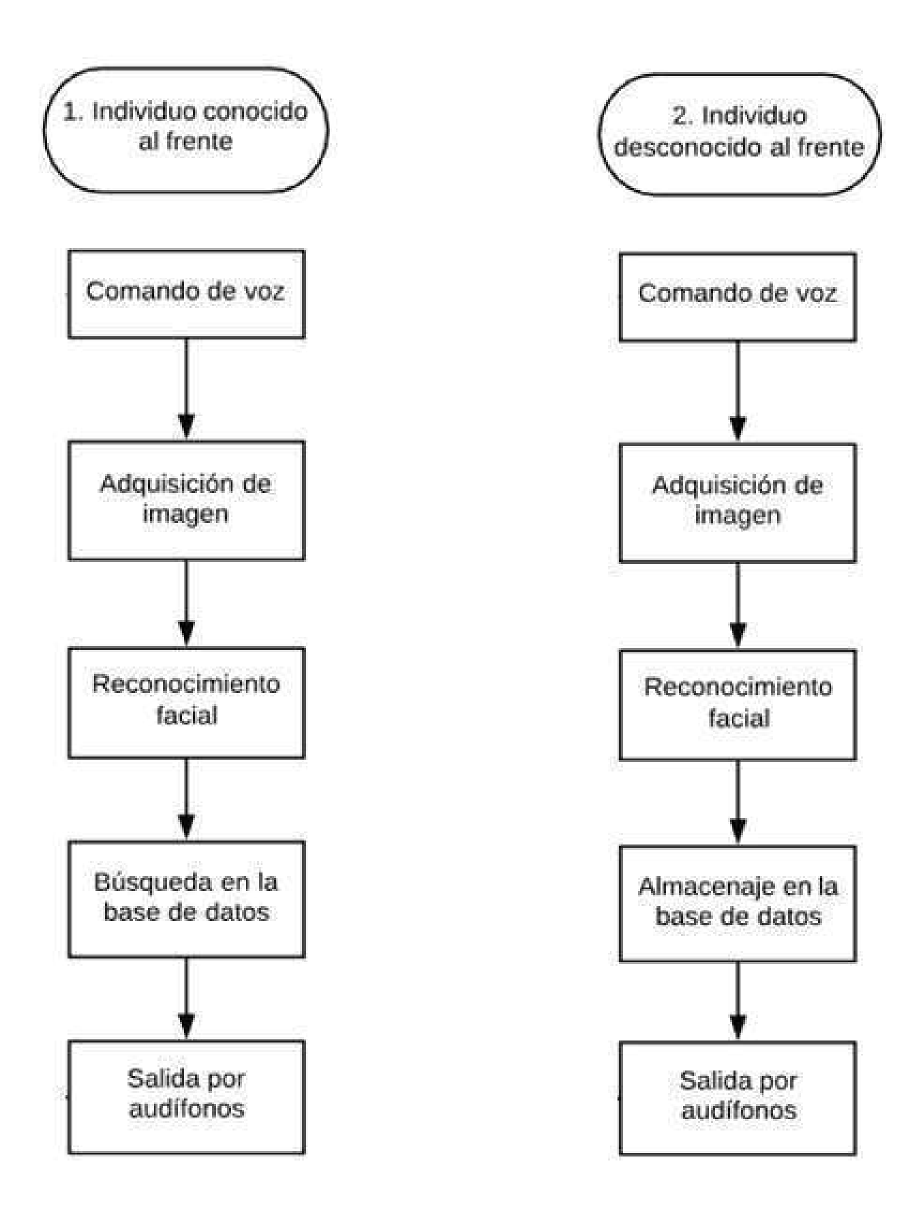


Figura 9: (1) Secuencia a seguir para el análisis facial de un individuo conocido, (2) Secuencia a seguir para el análisis de un individuo desconocido.

El proceso para la detección de rostros empieza con un comando de voz por parte del usuario, como por ejemplo, “Heimdall, ¿Quién está al frente?”. El sistema tomará una foto de la persona que se encuentra al frente, realiza el reconocimiento facial y luego comparará con la base de datos, si la persona coincide con alguna existente y por medio del micrófono Heimdall comunicará el nombre con el que el usuario lo haya guardado, utilizando la secuencia mostrada en la figura 9.1; caso contrario, si la persona no se encuentra en la base de datos, Heimdall comunicará al usuario que dicha persona es desconocida, y el usuario deberá iniciar con la secuencia de la figura 9.2.

4.2.3 Lectura



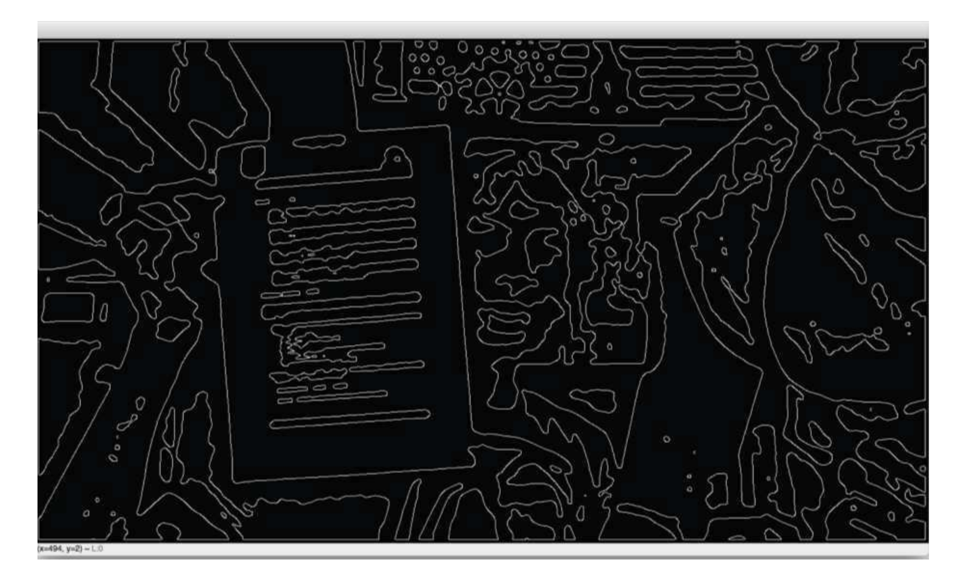


Figura 10. Prueba de detección de cuadros de texto

En la figura 10 se puede apreciar una prueba de detección de documento realizada con una carta en una hoja A4 sostenida en el aire. El proceso que se sigue para la lectura, es el mostrado en la figura 11. En la función de lectura, el usuario inicia con un comando de voz, "Heimdall, lee la carta...", seguido de esto el dispositivo, por medio de procesamiento digital de imagen con ayuda de OpenCV, identifica los recuadros donde se encuentren textos, luego de que la sección objetivo de lectura haya sido detectada y preprocesada, esta se "lee" con "tesseract-OCR" reconociendo las palabras encontradas en la imagen las cuales luego son agrupadas en conjuntos de textos comunes, se identifican en esta implementación oraciones y párrafos los cuales son comunicadas al usuario a través de audio.

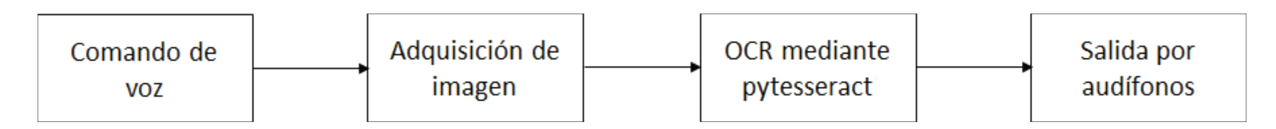


Figura 11: Secuencia de lectura

4.2.4 Domótica

Habilitando conectividad a internet, Heimdall puede acoplarse a sistemas domóticos, permitiendo el control y automatización inteligente de la vivienda del usuario permitiendo una gestión inteligente en el uso de la energía y aportando a su vez comodidad y confort. El prototipo actualiza una base de datos, bajo órdenes del usuario, que es leída constantemente por un controlador en casa y ejecuta las acciones requeridas por la persona. La interacción se desarrolla por medio de "node.js" para el envío y la recepción de la información en conjunto con "Firebase" para el almacenamiento de los datos.

5. Resultados

La interacción con el sistema comienza con el envío de comandos de voz mediante el micrófono, los cuales al ser reconocidos ejecutan una acción, dependiendo del contexto actual y el futuro (una acción puede generar una modificación en el contexto la cual debe ser evaluada) para finalmente dar una retroalimentación por medio de la salida implementada de audio.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 39, pp. 493-506.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



La detección de rostros tuvo una precisión del 98%. Sólo se necesitaba de una imagen de la persona en la base de datos para que el sistema pueda detectarlo correctamente. El prototipo no incluyó una cámara de visión nocturna lo que generó dificultades en el reconocimiento en condiciones de luz no favorables.

Para la obtención del texto se necesitaba que la cámara encaje con el margen del texto a leer, caso contrario se omitía letras del texto. La precisión fue de un 65%. Requiere un mayor desarrollo, se prevé el agregado de machine learning para mejorar la adaptación a exteriores donde las cantidades de luz no son controladas.

La conectividad a internet permite la inclusión del IoT. Pudiéndose conectar a diferentes electrodomésticos del hogar u obtener información de diferentes dispositivos.

Al momento de agregar a una nueva persona a la base de datos, se requiere de una ayuda por un agente externo al usuario, bajando el nivel de independencia que se le proporciona al usuario.



Figura 12. Prototipo final.

En la figura 12. se observa el prototipo implementado, se encuentran las gafas con la cámara, el procesador en el brazo del usuario y el portador de baterías para el sistema, la cual son recargables para extender el uso del mismo.

6. Conclusiones

Se obtuvo un prototipo que cumple los componentes básicos de la interfaz del modelo planteado, con los componentes esenciales como base para el enfoque del dispositivo, obteniendo así, un asistente personal para personas con discapacidad visual.

Por medio del Procesamiento Digital de Imágenes y OCR se logró la identificación de distintas tipografías, convirtiendo las gafas habituales de los invidentes en un lector óptico. Dicha versatilidad apunta a que el usuario pueda leer sin problemas documentos, cartas de correo, vallas publicitarias, libros y letreros en las calles, cualquier texto en el lugar en el que se encuentre.

Las funciones que incluye Heimdall, hacen que el usuario pueda desenvolverse de manera natural en su vida diaria, tener más oportunidades en el mercado laboral, ganar mayor independencia, mantener una mejor interacción social.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se comprueba la extensibilidad del sistema mediante la implementación de IoT, con la intención de mejorar la interacción de las personas invidentes con su hogar.

Se establece como trabajo a futuro la detección de emociones que ayudaría a las personas con discapacidad visual a comprender mejor su entorno en las conversaciones frente a personas videntes permitiéndoles mostrar una mejor reacción con lo que sucede alrededor y a mantener conversaciones relajadas, conociendo el estado emocional de la otra persona. Mediante el Machine Learning se puede entrenar al dispositivo para el reconocimiento de objetos comunes, con ésto se lograría que el usuario pueda transitar sin problemas por las calles, además de realizar tareas comunes como compras del supermercado, selección de objetos, entre otras.

Referencias

[1] Bourne RRA, Flaxman SR, Braithwaite T, Cicinelli MV, Das A, Jonas JB, et al.; Vision Loss Expert Group. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. Lancet Glob Health. 2017 Sep;5(9):e888–97.

[2] WARREN, D. H. (1984). Blindness and early childhood development. Nueva York: American Foundation for the Blind.

[3] HILL, L. W., y BLASCH, B. B. (1980). Concept development. En: R. L. WELSH, y B. B. BLASCH (eds.)., Foundations of orientation and mobiliy, pp, 265-290. New York: American Foundation for the Blind.

[4] Sharma, F. R., & Wasson, S. G. (2012). Speech recognition and synthesis tool: assistive technology for physically disabled persons. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, *3*(4), 86-91.

[5] T. Valls Mataro. *“An Assistive Mobile System Supporting Blind and Visual Impaired People when Are Outdoor “*

[6] Carpio. M, *“La tecnología asistiva como disciplina para la atención pedagógica de personas con discapacidad intelectual”* Volumen 12, número 2, 2012.

[7] WARREN, D. H. *“Blindness and early childhood development.”* Nueva York: American Foundation for the Blind,1984.

[8] BONFANTI, B. H. *“Effects of training on nonverbal and verbal behaviors of cogenitally blind adults.”* Journal of Visual Impairment and Blindness, 73, 1-9,1979.

[9] HARRELL, R. L., y STRAUSS, F. A. *“Aproaches to increasing assertive behavior and communication skills in blind and visually impaired persons.”* Journal of Visual Impairment and Blindness, 80, 794-798,1986.

[10] BARRAGA, N. C. “*Visual handicaps and learning: A developmental approach”* Belmont, CA: Wadsworth, 1976.

[11] SCOTT, R. A. *“The socialization of blind children”* En: D. GOSLIN (ed.), Handbook of Socialization Theory and Research, pp.1025-1045. Chicago: Rand McNally, 1969.

[12] VAN HASSELT, V. B. Social adaptation in the blind. Clinical Psychology Review, (87-102), 1983.

[13] O’DONNELL, L. M., y LIVINGSTON, R. L. *“Active exploration of the environment by young children with low vision”* Journal of Visual Impairment and Blindness, 85, 287-290, 1991.

[14] Krishna, S., Colbry D., Black, J. *“A systematic requirements analysis and development of an assistive device to enhance the social interaction of people who are blind or visually impaired”* School of computing and informatics, Arizona State University, Tempe AZ85281, USA,pag 5, 2008.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 507-514.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Ingeniería de Reversa de un Gripper Robótico de Dos Pinzas con Manufactura Aditiva

León Camacho Horacio[1], Rodríguez Salcedo Itzerai[1] y Arcos Hernández Pedro[1]

División de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica del Valle de México.

Resumen

En este trabajo se muestra el análisis de ingeniería de reversa en un gripper robótico, utilizando técnicas de manufactura aditiva. La metodología utilizada fue el enfoque basado en pruebas, y se consideraron filamentos de PLA, y, ABS. Para el desarrollo de los archivos STL, se utilizó, SolidWorks, y para la generación de capas y código G&M, se utilizó Cura de Ultimaker. Los prototipos fueron impresos en una máquina Prusa i3 metálica. En los resultados se muestran los tiempos de impresión por pieza, el consumo de material, los costos de materia prima, así como los costos por consumo de energía eléctrica, tanto para ABS, como PLA. Se concluye que el costo de impresión en ABS, y PLA es menor en un 70%, al costo de importación del gripper base, elaborado por inyección de plástico. Además de que se requiere realizar más pruebas en otros materiales, y modificar diversos parámetros de impresión como son, calidad, relleno, temperaturas, velocidades de impresión, refrigeración, soporte y adherencia a la placa de impresión.

Palabras clave: Gripper, Ingeniería de Reversa, Manufactura Aditiva.

1. Introducción

La manufactura aditiva (MA), es el nombre utilizado para describir las tecnologías que permiten manufacturar objetos 3D, agregando capas de material, los cuales pueden ser, plásticos, metales, alimentos, e incluso material para tejidos humanos. El término MA, enfatiza diversas tecnologías, desde impresión 3D, prototipado rápido, manufactura digital directa, manufactura por capas, entre otras. Actualmente es utilizada en la elaboración de productos de aviación, restauración dental, implantes médicos, automóviles, partes de robot, elaboración de productos con fines didácticos, e incluso en accesorios portátiles (wereables), vestidos, zapatos y joyería.

Hoy día, existe una gama muy amplia de materiales utilizados para la impresión 3D, que van desde PLA (ácido poliláctico), ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PET (Tereftalato de polietileno), FC (Fibra de carbono), Nylon, Polvo de yeso, Resinas Fotosensibles, y muchos más. Además, existen diversos colores, acabados y diámetros de filamentos, lo que los hace atractivos, desde la perspectiva de costo, como de elección para el diseño estético.

La MA, permite acelerar el proceso de aprendizaje en la Ingeniería de Reversa (IR), ya que facilita el análisis de los productos de la competencia, buscar compatibilidades en el diseño y la manufactura, o detectar áreas de mejora, así como encontrar detalles técnicos que muchas veces están ocultos en las patentes. Un efector final, o gripper, es el elemento terminal de un robot, y está diseñado para interactuar con el entorno. Su naturaleza depende de la aplicación del robot.

La tendencia en el diseño de efectores está cambiando de un enfoque de grippers rígidos, donde existen grandes fuerzas, velocidades, mecanismos y control complicados, así como una alta necesidad de precisión frente a tareas repetitivas, contrastando por otro lado, con los efectores de tipo “suaves”, que son adaptativos a diferentes formas con mecanismos y control sencillo, de bajo costo,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



fuerza, precisión, y energía, [1]. La empresa ABB, ha utilizado un amplio rango de grippers personalizados en sus proyectos industriales, con robots colaborativos (YuMi), para tareas en el sector electrónico, y, automotriz, [2].

El objetivo de este trabajo consiste en realizar la ingeniería de reversa de un gripper, tipo Tetrix-Prime®, de dos pinzas, accionado con servomotor standard el cuál fue importado de Estados Unidos, y su costo incluyendo el transporte fue de $350.00, ver figura 1. Para lograr lo anterior, se sigue la metodología basada en pruebas para impresión 3D, consistente en seis pasos: 1) Diseño; 2) Preprocesamiento; 3) Impresión; 4) Post-Procesamiento; 5) Impresión final; y, 6) Pruebas, mismos que serán explicados en la sección siguiente.

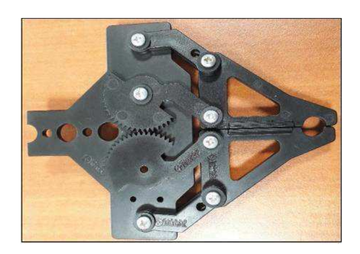


Figura 1. Gripper de 2 dedos, tipo Tetrix-Prime®, obtenido de: www.tetrixrobotics.com

2. Metodología

1) La etapa de Diseño consiste en la identificación física de medidas del prototipo, la elaboración del diseño de cada parte, su ensamblaje, el estudio de movimiento causado por los engranes, así como la longitud máxima de apertura en las pinzas, y la generación de planos en SolidWorks®, ver figura 2.

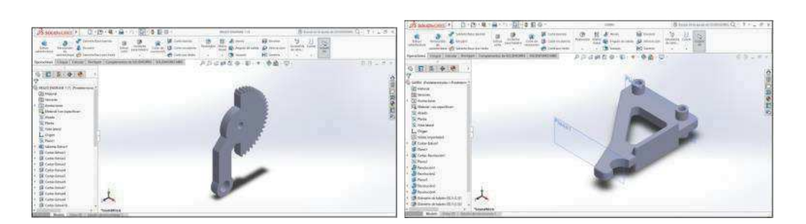


Figura 2. Engrane y Pinza del Gripper de 2 dedos, tipo Tetrix-Prime®

2) El preprocesamiento consiste en el cambio de formato de diseño, “sldprt”, y “sldasm”, a formato de impresión 3D, “stl”, necesarios para la lectura de datos en el software Cura®. En este, se establecen los parámetros del proceso, la generación del Slicer, y el código G&M, ver figura 3.

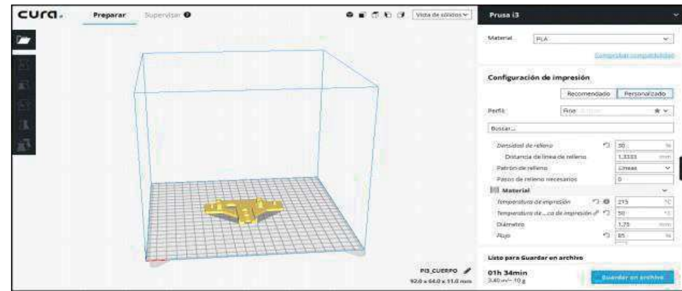


Figura 3. Pinza del Gripper en Cura®

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3) La impresión 3D, implica, establecer los parámetros de arranque de la máquina, asegurarse que la cama de la impresora se encuentre nivelada, el extrusor se encuentre en buen estado y alimentado por filamento en la boquilla de impresión, así como establecer la comunicación entre el archivo de código numérico, “gcode” generado por Cura®, ya sea por medio de una memoria SD, o por vía alámbrica a la impresora Prusa-i3®, ver figura 4.

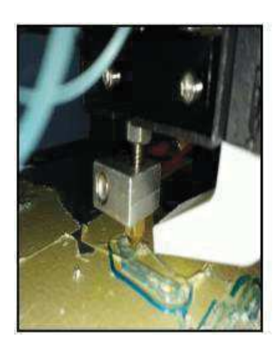
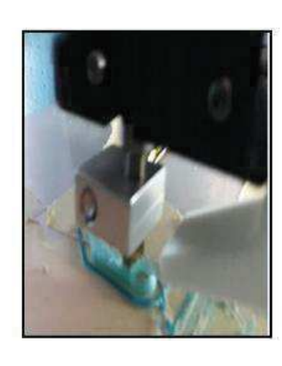
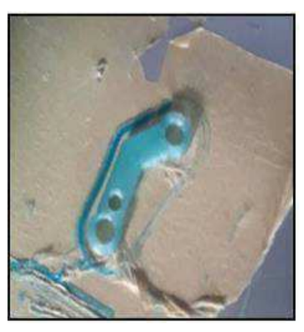




Figura 4. Eslabón del Gripper en Prusa-i3®

4) El Post-procesamiento, está relacionado con los tratamientos térmicos aplicados a la pieza, o el acabado superficial requerido, en este caso, se utiliza el alisado, directamente aplicado en los parámetros de software, y en la máquina, que consisten en reducir la velocidad de impresión, así como establecer salida fina del filamento, y regular condiciones de temperatura.

5) Parte Final, en está se analizan los esfuerzos residuales existentes en la manufactura de las piezas, como el warping, cracking, o, porosidad, ver figura 5.

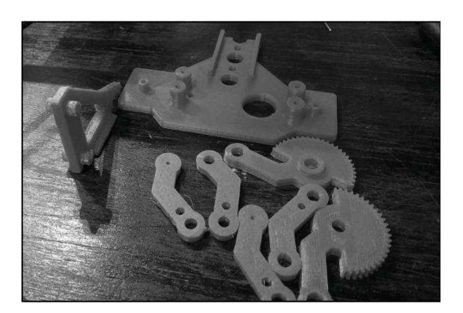


Figura 5. Componentes impresos en Prusa-i3®

En este trabajo se utiliza el enfoque basado en pruebas, fundamentado en un proceso iterativo, la figura 6, lo muestra con más claridad.

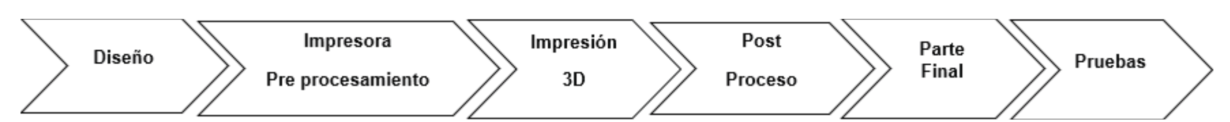


Figura 6. Enfoque basado en pruebas

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 40, pp. 507-514.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

A continuación, se muestran los parámetros de impresión utilizados en el software Ultimaker-Cura-3.2.1, con ABS, y PLA.

Tabla 1. Parámetros de impresión en Cura

Material	ABS	PLA
CALIDAD [mm]		
Altura de Capa	0.15	0.15
Altura de capa inicial	0.3	0.3
Ancho de línea	0.4	0.4
PÉRIMETRO [mm]		
Grosor de pared	0.6	0.6
Grosor Superior/Inferior	0.6	0.6
RELLENO [%]		
Densidad de relleno	20	20
TEMPERATURAS [°C]		
Impresión predeterminada	240	200
Temperatura de Impresión	240	200
Impresión capa inicial	245	200
Impresión inicial	245	200
Impresión final	230	200
Placa de impresión	90	60
VELOCIDAD (mm/s)		
Impresión	60	80
Desplazamiento	100	250
REFRIGERACIÓN		
Velocidad Ventilador	0	0
ADHERENCIA PLACA IMPRESIÓN		
Tipo de adherencia	Balsa	Balsa
Cámara de aire en la balsa	0.3 mm	0.3 mm
Superposición capas Z	0.15 mm	0.15 mm
Capas superiores balsa	2	2

En la siguiente tabla, se muestran los tiempos de impresión y el material utilizado, para el PLA, y ABS, ver tabla 2.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 2. Tiempos de impresión y material utilizado en ABS.

Elemento	Tiempo impresión ABS [min]	Tiempo impresión PLA [min]	Cantidad [piezas]	Tiempo total ABS [min]	Tiempo total PLA [min]	Material Utilizado ABS [m]	Material Utilizado PLA [m]
Pinza	37	57	2	74	114	2	1.36
Engrane	38	26	2	76	52	1.39	0.68
Base	167	159	1	167	159	2.22	2.13
Pivote	24	11	4	96	44	1.23	0.60
Bujes	2	1	12	24	12	0.03	0.24
Total	268	254	21	437	381	6.87	5.01

De lo anterior puede mencionarse que el tiempo total de impresión del ABS, fue de 7.28 horas, y casi 7 m de filamento utilizado, contra las 6.35 horas en PLA, y 5 m de filamento. El costo por rollo de filamento de 1Kg, con 330 metros, es de $480 MXN, y el costo de electricidad es de 2.28 Kwh. En la tabla 3, se muestra el costo por consumo eléctrico para la impresión de este prototipo.

Tabla 3. Costos por consumo eléctrico para prototipo en ABS y PLA.

Potencia del equipo [W]	Tiempo de impresión Total, ABS [Horas]	Tiempo de Impresión Total PLA [Horas]	Consumo eléctrico impresora por pieza ABS Kw-h/pieza	Consumo eléctrico impresora por pieza PLA Kw-h/pieza	Costo por consumo eléctrico para fabricar una pieza [$MXN]	
					ABS	PLA
156	7.28	6.35	1.14	0.99	2.6	2.26

Para el cálculo de costos por unidad, se utiliza un modelo de costos de primer orden, donde las variables principales a obtener son el Setup cost (Sc), Costo del material (Cm), Tiempo de impresión (Pt), Costo de Operación (Oc), unidades o piezas (x), estableciendo

$$Y=[Sc + Cm + (Pt*Oc)]/x \quad (1)$$

Los costos por la elaboración del diseño, y su configuración en la impresora, hasta su carga en la impresora 3D, son muy variables, por lo que se toman como base, 3 criterios, básico, intermedio, avanzado, considerando $100, $500, y $1000 respectivamente.

El Costo del material es calculado en función del material utilizado, el costo del filamento, y el material total de filamento.

Tabla 4. Costos por Unidad en ABS y PLA

Setup Cost $MXN	Costo del material ABS [$/pieza terminada]	Costo del material PLA [$/pieza terminada]	Costos de Operación $/hora	ABS Costo por Unidad $/Unidad	PLA Costo por Unidad $/Unidad
100	10	7.3	0.356	112.6	109.56

El Costo de producción de 1, 10, 100, 500, y 1000 piezas, es calculado. Los resultados muestran, que, a mayor cantidad producida, menor es el costo unitario, hasta que prácticamente se estabiliza, destacando, que, a partir de una producción de 100 piezas, los precios son favorables bajo cualquier condición de costos setup, Sc, ver figuras 7,8,9.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



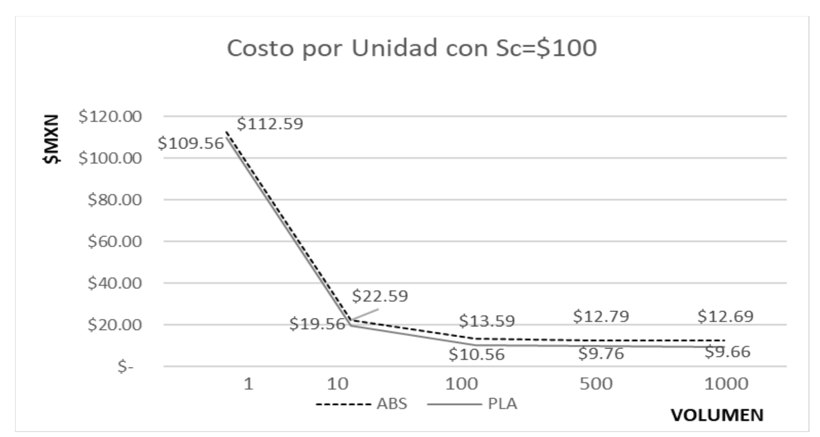


Figura 7. Costo vs Volumen para Setup Cost de $100 MXN



Figura 8. Costo vs Volumen para Setup Cost de $500 MXN

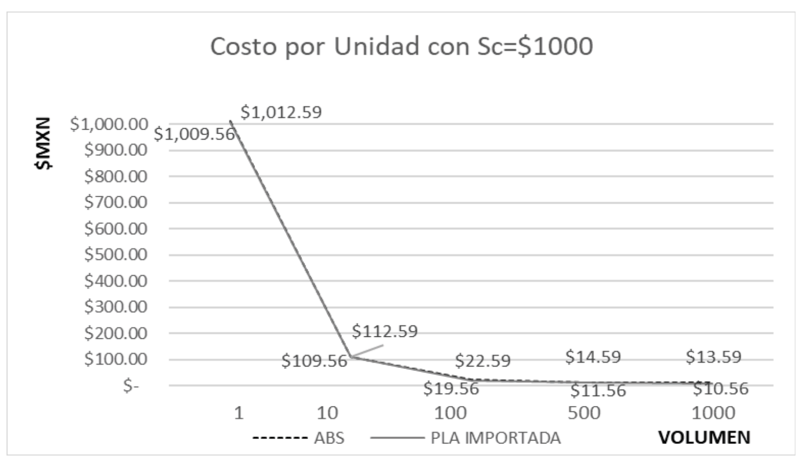


Figura 9. Costo vs Volumen para Setup Cost de $1000 MXN

ISBN: 978-607-9394-14-1.



4. Conclusiones

La construcción de un prototipo de esta naturaleza permite evaluar la apropiación de la tecnología con recursos locales, lo cual implica diversos retos, que son mencionados a continuación.

La adherencia en cama o base de impresión, es un factor crítico, por lo que se recomienda utilizar un adecuado adhesivo. En este caso se utilizó cinta doble cara, sin embargo, al momento de utilizar ABS, se presentaban condiciones de warping, ocasionando golpes entre el extrusor y la pieza, lo cual provocó 3 iteraciones de diseño adicionales, para modificar los parámetros de impresión. Se buscaron simuladores de slicer, para evitar tantas iteraciones físicas, pero aún el software es limitado en este aspecto.

Bajo la óptica de ingeniería de reversa, se sugiere el rediseño del engranaje con comparador óptico, así como la modificación de los parámetros, tanto, en el diseño mecánico del engrane, como en los parámetros del software Cura, reduciendo la velocidad de impresión, y haciendo más fina la extrusión de filamento.

Es importante definir características de acabado superficial, en este caso, alisado, planchando sólo capas superiores con patrones en zigzag, y velocidad de alisado de 15 mm/seg. También se recomienda reducir el relleno, para bajar los valores de presión interna que ejerce el plástico, haciendo menor el riesgo de deformación.

No se consideraron los aspectos de costos por mantenimiento, ni de adquisición del equipo para manufactura aditiva. En este caso, el tiempo de ajuste de la impresora tuvo una duración de 4 horas, ya que se nivelo la cama, y se modificó el ajuste en las bandas dentadas.

El costo del producto importado fue de $350, mientras que el costo del prototipo en PLA, fue de $109.56, y el del ABS, fue de $112.6, considerando un Setup Cost de $100. Para la fabricación de una pieza, con un Setup Cost de $500, se recomienda una producción por arriba de 100 piezas, para que los costos se encuentren por debajo de los $20 MXN, que es un caso similar, para costos de Setup, de $1000 MXN.
Los tiempos de impresión para una pieza completa son equivalentes a 7.28 horas en ABS, y 6.3 horas en PLA, con un consumo eléctrico total de 1.14 Kw.

Sería muy positivo establecer en futuras investigaciones, un análisis comparativo con un proceso tradicional de manufactura, como la inyección de plásticos, esto permitiría obtener los costos por molde, material, tiempo de moldeo, y costos de operación, facilitando con ello, una comparación más apropiada, frente a las tecnologías aditivas.

Es de suma importancia, mencionar que el proceso de manufactura aditiva es muy atractivo, ya que efectivamente reduce la curva de aprendizaje para el desarrollo de prototipos y abre más interrogantes a ser resueltas derivadas del proceso complejo en el ajuste de los parámetros para la impresión 3D.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Referencias

[1] Kyu-Jin Ch. *“Soft Bio-Inspired Robotics”*, *Seoul National University*. Available on: https://vimeo.com/138799359
[2] www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15944/Get-a-Grip-3D-Printing-Robot-Fingers-at-ABB.aspx
[3] León H. “Curso de Diseño para la Manufactura y el Ensamble en el programa de Maestría en Manufactura en la Universidad Politécnica del Valle de México”.
[4] Evans Brian. (2012). “Practical 3D Printers, The science and art of 3D printing”. Apress
[5] Sculpteo´s. (2016). 3D Printing Materials Bible. Sculpteo

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 515-528.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Diseño Conceptual de un Sistema Automatizado para Sombrilla Basado en la Incidencia de los Rayos del Sol

Bernabé Benítez Alberto, Medina Espitia Kevin Eduardo, Salvador Hernández Michelle, Hernández Lara Derlis y Manzano Osornio Víctor Iván

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
División de Ingeniería Informática
Laboratorio de sistemas electrónicos e ingeniería de software

Resumen

Este proyecto es sobre una sombrilla que protege a las personas de los rayos del sol en zonas abiertas (playas, restaurantes al aire libre, terrazas), para limitar daños en la piel a causa de este fenómeno. La forma en que funciona es siguiendo la incidencia de los rayos del sol con un sensor de luz, cuenta con un movimiento en dos planos (x, y), ya que con estos se puede cubrir un área de trabajo aceptable. El diseño e implementación del sistema se llevó a cabo utilizando como herramienta de diseño la metodología QFD (por sus siglas en inglés, ***Quality Funtion Deployment****), que se basa en los requerimientos del cliente y significa despliegue de la función de calidad. Los resultados obtenidos muestran que el sistema funciona adecuadamente y es viable su utilización.*

Palabras clave: Sombrilla, sensor de luz, rayos del sol.

1. Introducción

Este proyecto está basado en la implementación y diseño de un circuito de obtención de información mediante un sensor de luz, que capta el nivel de incidencia de los rayos del sol sobre una sombrilla Modelo 3852mat-sspav. La idea consiste en captar esta información del ambiente y así poder manipular una sombrilla para que brinde sombra en el área necesaria. La iluminancia es el flujo luminoso incidente por unidad de superficie [4]. La iluminancia está dada en Lux (Lux=lm/m²). Es una unidad del sistema Internacional utilizada para caracterizar las condiciones de iluminación. Se usa en la fotometría como medida de la iluminancia, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad (obsérvese la ecuación 1).

$$lux = \frac{lm}{m^2}(lx) \tag{1}$$

Para poder mover el brazo de la sombrilla se utilizan dos servomotores Sg-90, uno se encarga del movimiento en el eje *X* (horizontal) y el otro en el eje *Y* (vertical), con estos dos planos se cubre el área de trabajo necesario para cumplir con el objetivo de este proyecto [2].

1.1 Sensor LDR

Los resistores dependientes de la luz LDR (***Light Dependent Resistor***) o foto resistores son dispositivos que varían su resistencia en función de la luz que incide en su superficie fotosensible. Se construyen a base de semiconductores que no tienen una unión PN, el semiconductor principal es el "sulfuro de cadmio", que tienen una sensibilidad a la luz similar a la del ojo humano. Por lo general, requieren de algunos milisegundos para responder a los cambios de la intensidad luminosa, véase figura 1.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



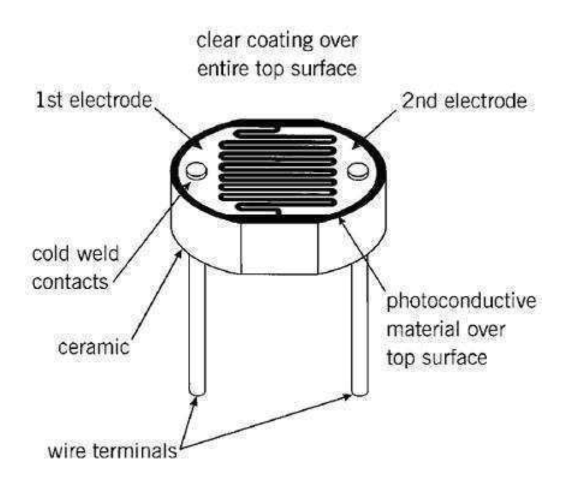


Figura 1. Sensor de luz LDR.

1.2 Exceso de ganancia

La curva de exceso de ganancia se especifica en cada tipo de sensor fotoeléctrico, y la misma está en función de la distancia de censado [1]. Esta curva es usada al momento de seleccionar el sensor, para predecir la confiabilidad de la detección en un ambiente conocido como se muestra en la figura 2.

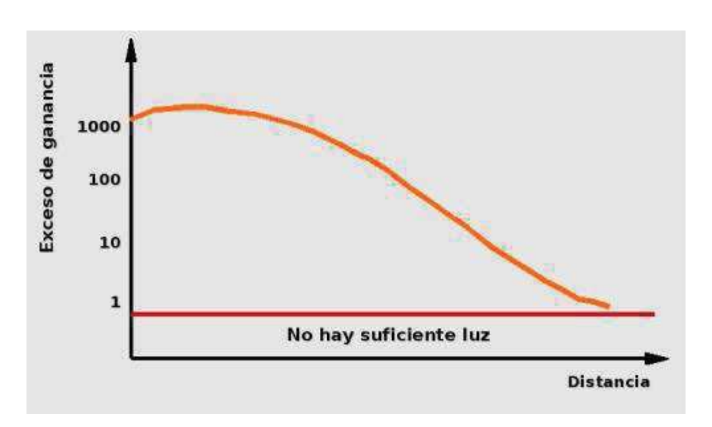


Figura 2. Ganancias sensor fotoeléctrico.

2. Desarrollo

En general en ingeniería existen varios modelos de diseño, por ejemplo, Cross (1999) los clasifica en dos grupos: descriptivos y prescriptivos, mientras que Takeda (1990) citando a Finger y Dixon (1989) adiciona dos más: cognitivos y computacionales. Para este trabajo se utilizó el modelo de diseño planteado por Asimow (1962) que consta de dos etapas: diseño conceptual (planeación y morfología) y diseño a detalle. El proceso de *diseño conceptual* consiste esencialmente en obtener una solución a un problema de diseño particular a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades planteadas, mientras que la fase de *diseño a detalle* corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para la producción del producto-solución [7].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para la obtención del diseño conceptual del prototipo, se utilizó la metodología QFD (por sus siglas en inglés, ***Quality Function Deployment***), con la cual se puede llegar a un diseño funcional y competitivo, señalando que éste puede ser mejorado en la etapa de diseño a detalle. A continuación se muestran las consideraciones más significativas de dicha metodología de diseño [9].

2.1 Determinación y clasificación de los requerimientos del cliente

Los requerimientos presentados se obtuvieron con encuestas a personas que normalmente se encuentran en zonas libres, se les pregunto si les gustaría que una sombrilla se moviera de manera automática conforme a la trayectoria del sol para que los cubriera en cada momento del día, y que requerimientos debería cumplir, entre otras cuestiones.

A) Requerimientos funcionales

A1) Deberá hacer movimientos en dos planos (*x, y*).
A2) Cuando se detecte rayos del sol mediante el sensor, el sistema deberá moverse conforme la trayectoria de dichos rayos.

B) Requerimientos físicos

B1) Se abre a 259.08 cm de ancho.
B2) Apta para mesas con orificio central de 4 cm de diámetro.
B3) Duradera tela de poliéster hilada, resiste la decoloración y el moho, lavables.
B4) Que su peso no exceda de 15 kg.

D) Requerimientos de Mantenimiento

D1) Refacciones fáciles de conseguir.
D2) Mantenimiento Fácil.
D3) Refacciones de bajo costo.

E) Requerimientos económicos

E1) Que el diseño e implementación del sistema no pase de $6500.

F) Requerimiento de adaptación

F1) Que se instale en cualquier plataforma normalizada.

2.2 Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables

Se muestra la clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables, con el fin de diseñar tomando en cuenta todos los requerimientos obligatorios y ver cuáles de los deseables se pueden establecer en el diseño. Ponderación de los requerimientos deseables una vez identificados los requerimientos deseables se ponderan para saber su orden de importancia en el sistema y establecer cuales son más prioritarios para ser incluidos en el diseño, lo ideal es que se incluyan todos. Pero esto dependerá de que no interfieran en el cumplimiento de los requerimientos obligatorios, como se muestra en la tabla 1.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 1. Clasificación de los requerimientos en obligatorios y deseables.

OBLIGATORIOS	DESEABLES
A1) Deberá hacer movimientos en dos planos (*x, y*)	**B3)** Duradera tela de poliéster hilada, resiste la decoloración y el moho lavables
A2) Cuando se detecte rayos del sol mediante el sensor, el sistema deberá moverse conforme la trayectoria de dichos rayos	**B4)** El diseño se podrá manejar manualmente al momento de abrir la sombrilla
B1) Se abre 259.08 cm de ancho	**D2)** Mantenimiento fácil
B2) Apta para mesas con orificio central de 4 cm de diámetro	**D3)** Refacciones de bajo costo
D1) Refacciones fáciles de conseguir	
E1) Que el diseño e implementación del sistema no pase de $6500	
F1) que se instale en cualquier plataforma normalizada	

Para obtener el cálculo se utilizan dos valores de comparación. (+). Significa que el requerimiento de comparación es más importante que los demás. (-) Significa que el requerimiento de comparación no es más importante que los demás. Una vez que se ha llenado la tabla 2 con los valores de comparación, se calculan los pesos relativos de cada requerimiento deseable mediante la ecuación (2), donde Σ (+) es el número de veces que el requerimiento fue más importante comparado con los demás.

$$Ir(\%) = \frac{\sum +}{total} * 100 \tag{2}$$

Tabla 2. Ponderación de los requerimientos deseables.

	B3	B4	D2	D3	∑(+)	Ir (%)
B3		-	+	+	2	28.57
B4	+		-	+	1	11.2
D2	-	+		-	2	28.57
D3	+	-	+		2	28.57
					7	100.00

Se procede a realizar la tabla 3, en la cual se colocan los requerimientos deseables según el orden de importancia obtenida en la comparación de la tabla 2.



Tabla 3. Orden de importancia de los requerimientos deseables.

Orden de importancia	REQUERIMIENTOS DESEABLES	∑(+)	Ir (%)
1	**B3)** Duradera tela de poliéster hilada, resiste la decoloración y el moho lavables	2	28.57
2	**D2)** Mantenimiento fácil	2	28.57
3	**D3)** Refacciones de bajo costo	2	28.57
4	**B4)** El diseño se podrá manejar manualmente al momento de abrirla	1	14.28
	Total	7	100.0

2.3 Traducción de los requerimientos a términos mensurables de ingeniería

Los requerimientos, se tienen que llevar a un nivel de traducción cuantificable, es decir, todos aquellos requerimientos hechos por el cliente hay que definirlos en términos mensurables de ingeniería, donde se referirá a la actividad que éste implica, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Traducción a términos mensurables de ingeniería.

Requerimientos del cliente	Términos mensurables de ingeniería
A1) Deberá hacer movimientos en dos planos (*x, y*)	**A1)** Tener instalado servos para el movimiento
A2) Cuando se detecte rayos del sol mediante el sensor, el sistema deberá moverse conforme la trayectoria de dichos rayos	**A2)** Dos Fotorresistencias LDR Gl5516 Sensor De Luz Arduino
B1) Se abre a 259.08 cm de ancho	**B1)** Área total del sistema no mayor a 259.08 cm de ancho
B2) Apta para mesas con orificio central de 4 cm de diámetro	**B2)** Apta para mesas con orificio central de 4 cm de diámetro
B3) Duradera tela de poliéster hilada resiste la decoloración y el moho lavables	**B3)** Tela hilada
B4) Que su peso no exceda de 15 kg.	**B4)** Peso igual o menor a 15 kg
D1) Refacciones fáciles de conseguir	**D1)** Refacciones en el mercado Nacional
D2) Mantenimiento fácil	**D2)** Mantenimiento fácil
D3) Refacciones de bajo costo	**D3)** Bajo costo de mantenimiento
E1) Que el diseño e implementación del sistema no pase de $6500	**E1)** costo de producción menor a $6500.00
F1) Que se instale en cualquier plataforma normalizada	**F1**) Debe cumplir con las normas para que se instale en cualquier plataforma

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 515-528.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.4 Metas de Diseño

- Tener instalado 2 servos Sg-90 para el movimiento (x , y).
- Fotorresistencia Ldr Gl5516 Sensor De Luz Arduino.
- Área total del sistema no mayor a 259.08 cm de ancho.
- Tela hilada.
- Peso igual o menor a 15 kilogramos.
- Refacciones en el mercado nacional.
- Mantenimiento fácil.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Costo de producción menor a $6500.00.

2.5 Análisis funcional del sistema

En el análisis funcional se detalla todas las funciones que el sistema debe cumplir, para esto se delimita la función global o principal del sistema y las sub-funciones que se tienen que realizar para que ésta se pueda llevar a cabo.

La función global de servicio del sistema en el proceso de diseño describe el papel a desempeñar del mismo, para lo cual se apoya de funciones de servicio que son todas aquellas acciones que serán realizadas por la máquina o sistema que se va a diseñar para dar solución a la necesidad planteada, y que pueden ser globales o de uso. En la figura 3 se puede apreciar el árbol de funciones del sistema a diseñar.

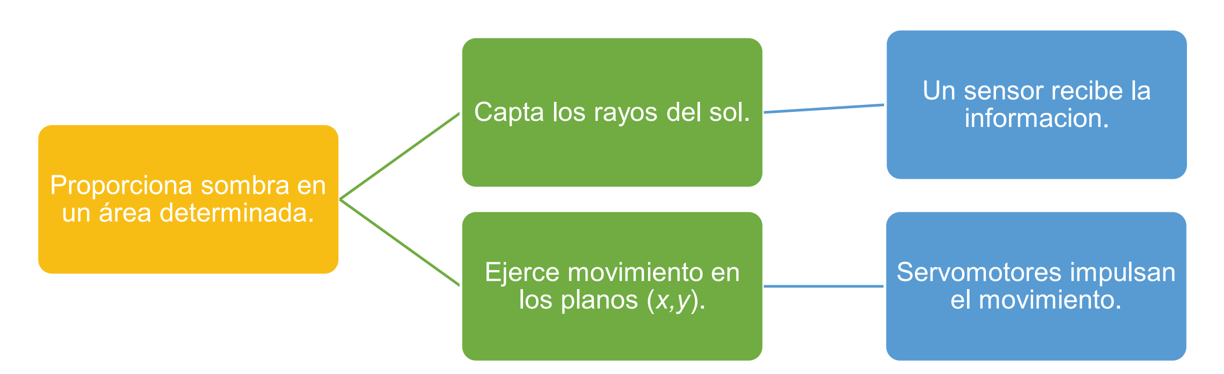


Figura 3. Árbol de funciones del sistema.

2.6 Generación y evaluación de conceptos

Una vez establecido el análisis funcional se proponen soluciones para resolver cada función, esto mediante una lluvia de ideas, y así generar los conceptos que darán forma al sistema a diseñar, los conceptos para este proyecto se muestra en la tabla 5. Una vez generadas las posibles soluciones a cada una de lasfunciones, se tiene que realizar una etapa de evaluación, para esto se utilizan tres filtros que ayudan a obtener el diseño que contemple de mejor manera las funciones y las expectativas del cliente [6].

El primer filtro es el filtro de factibilidad, donde las posibles soluciones se evalúan con base en que sean elementos que puedan cumplir con las funciones y no se contrapongan con algún requerimiento obligatorio dado por el cliente.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 5. Generación de conceptos.

FUNCIONES	A	B	C
1.- Forma del soporte de la sombrilla	Recto en la parte de en medio de la sombrilla	Curbo que sotenga la punta de la sombrilla	Triangular
2.-Forma de la parte superior de la sombrilla	Circular	Rectangular	Cuadrada
3.-Base de la sombrilla	Circular	Cuadrada	Hexagonal
4.-Movimiento de la sombrilla	Ejerciendo los planos (*x, y*)	En forma de brazo	Un tornillo sin fin
5.-Captar la luz emitida por los rayos del sol	Una fotorresistencia Ldr Gl5516 Sensor De Luz Arduino	Panel solar	Cilindros parabólicos
6.-Material	Lona inperniable	Tela acrilica	Tejido soltis

Tabla 6. Primer filtro. Evaluación por factibilidad.

Funciones	A	B	C
1.- Forma del soporte de la sombrilla	+	+	-
2.-Forma de la parte superior de la sombrilla	+	-	-
3.-Base de la sombrilla	+	+	-
4.-Movimiento de la sombrilla	+	+	-
5.-Captar la luz emitida por los rayos del sol	+	-	-
6.-Material	+	-	-
¿variable ?	SI	NO	NO

Partiendo de la tabla 6, se puede apreciar que algunas soluciones generadas en los conceptos B y C no cumplen de manera satisfactoria con este filtro pero, para no desechar los conceptos que si cumplieron se genera una mezcla entre los conceptos aceptables con este filtro y se forma un concepto BC; para su analisis despues de los filtros. De igual manera las dos funciones que no fueron factibles del concepto son sustituidas con las soluciones que si pasaron del concepto A.

El segundo filtro es de disponibilidad tecnológica, en el cual se verifica que todas las soluciones a las funciones sean capaces de poderse diseñar o seleccionarse con base en los conocimientos teóricos de donde se puede apreciar en la tabla 7 que todos los conceptos cumplen de manera adecuada con este filtro. El tercer y último filtro es el de la evaluación de los conceptos basados en los requerimientos del cliente, para este caso en el concepto B y C una de sus funciones no cumple con las expectativas del cliente, lo cual conlleva a sustituir esa función por el elemento que se propone en A que si cumplió con este filtro (ver tabla 8).

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 7. Segundo filtro. Evaluación por disponibilidad tecnológica.

Funciones	A	B	C
1.- Forma del soporte de la sombrilla	+	+	+
2.-Forma de la parte superior de la sombrilla	+	+	-
3.-Base de la sombrilla	+	+	+
4.-Movimiento de la sombrilla	+	+	+
5.-Captar la luz emitida por los rayos del sol	+	+	+
6.-Material	+	+	+
¿variable ?	SI	SI	SI

Tabla 8. Tercer filtro. Evaluación basada en los requerimientos del cliente.

Funciones	A	B	C
1.- Forma del soporte de la sombrilla	+	+	+
2.-Forma de la parte superior de la sombrilla	+	+	+
3.-Base de la sombrilla	+	+	+
4.-Movimiento de la sombrilla	+	+	+
5.-Captar la luz emitida por los rayos del sol	+	+	+
6.-Material	+	+	+
¿variable ?	SI	SI	SI

En la tabla 9, se realizará una matriz de decisión, para la cual se necesitarán los requerimientos deseables y su calificación relativa, con lo que se obtendrá el concepto ganador, para esto se selecciona el concepto A como el concepto pivote, es decir que servirá como punto de comparación, si un concepto cumple de mejor manera el requerimiento se colocará un signo (+), y si lo cumple de igual o menor forma se colocará un signo (-).

Tabla 9. Evaluación basada en matrices de decisión.

Requerimientos deseables	Conceptos		
	Calificación relativa	A	BC
B3) Duradera tela de poliéster hilada resiste la decoración y el moho lavables	16.6	*	-
B4) El diseño de podra manejar manualmente al momento de abrir la sombrilla	16.6	*	+
D2) Mantenimiento Fácil	16.6	*	-
D3) Refacciones de bajo costo	16.6	*	+
∑+		4	2
	100	57.15	42.85
Mejor concepto (Ranking)		1	2

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.7 Concepto óptimo

Recordando que la fase de diseño optimo corresponde a la generación de todas las especificaciones necesarias para el diseño-soulcion, basándose en la tecnología disponible se llegó al diseño siguiente Despues de realizar los filtros se obtiene como ganador el concepto A.

El diseño de la sombrilla en la parte superior es circular, esta forma se adapta más a la portabilidad y es un diseño común que se encuentra en las sombríllas, tiene adaptado dos fotorresistencias LDR Gl5516 Sensor de luz arduino, que capta los rayos del sol ,el material con el que esta echa es lona impermiable esto se debe a que es más resistente a los cambios del clima. El tubo es recto ya que este tiene más estabilidad y mayor manipulacion de este al momento de cerrar la sombrilla en la parte superior se enuentran los servomotores que hacen los movimientos en dos planos (*x, y*) en la parte media se encuentra el arduino que recibirá la información captada por el sensor LDR y dará las ordenes a los servomotores, cuenta con una batería recargable esta se encuentra un como más abajo del arduino. La base es circular para que sostenga el peso de la sombrilla.

2.8 Materiales y características

A continuación se describen las caracteristicas y especificaciones de los materiales a utilizar para la implementación del proyecto propuesto, como se muestra en las tablas 10, 11, 12 y 13:

Tabla 10. Características de Fotorresistencias LDR Gl5516.

Fotorresistencias LDR Gl5516 Sensor de luz arduino
Modelo: GL5516
Voltaje máximo: 150 V
Consumo máximo de energía: 100 mV
Tiempo de respuesta: 30 ms
Diámetro de la cabeza: 5 mm
Longitud: 3.5 cm

Tabla 11. Características de servomotor.

Servomotor FR
Marca Mitsubishi
Entrada de pulso de alta frecuencia con 24 V, 12 V o 5 V
Voltaje 240v
Característica Bajo nivel de ruido y vibración al girar

Tabla12. Driver Stepper.

A4988 Stepper Motor Drive
Marca: Pololu
Peso 1.3 g
Dimensiones 2 x 1.52 x 0.1 cm
Voltaje de funcionamiento: 8 a 35 V
Apto para los motores de 12 V

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 41, pp. 515-528.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tabla 13. Características de Arduino uno.

Tarjeta arduino uno
Modelo: UNO
Microcontrolador: ATmega328P
Voltaje de funcionamiento: 5v
Microcontrolador: ATmega328
Voltaje de entrada: 7-12V
14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM)
6 entradas análogas
32k de memoria Flash

2.9 Implementación del diseño obtenido

A contnuacion se presentan los esquema realizados en la etapa de diseño a detalle, en la figura 4 se muestra la conexión electrónica de la etapa de control del sistema automatizado para sombrilla basado en la incidencia de los rayos del sol, que funciona con dos servomotores y dos sensores LDR conectados a un Arduino, mientras que en la figura 6 se visualiza el diseño de la sombrilla por computadora. En la figura 5 se observa como se procesa la informacion de los sensores LDR a la tarjeta arduino y el movimiento de los motores, este algoritmo conlleva a tener dos variables (x,y) que son los planos de movimiento, es decir los sonsores LDR, uno manipulará el movimiento hacia la izquierda y otro a la derecha, se determinó que los grados en que los motores se moveran será de 10° hasta 170° para no dañarlos. Se observa como se trabajará con los servomotores en el diseño obtenido por medio de un ***stepper*** o controlador de motor para la regulacion de la energia de la tarjeta arduino al motor como se muestra en la figura 4.1.

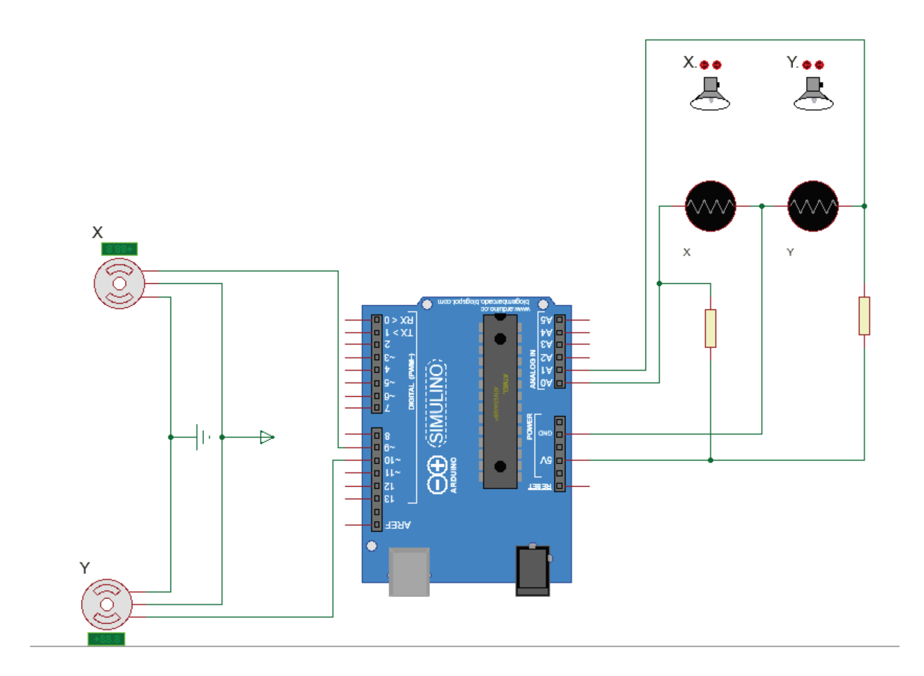


Figura 4. Conexión del circuito electrónico para el control de la sombrilla basado en la incidencia de los rayos del sol.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



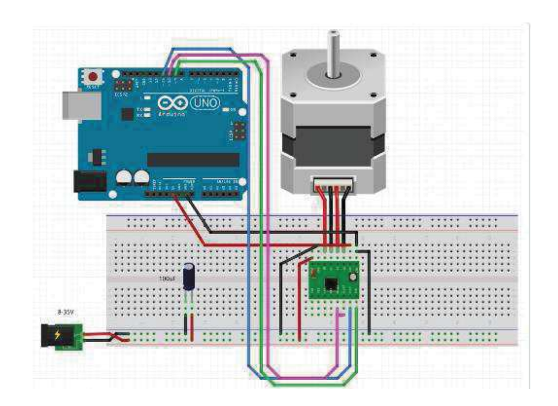


Figura 4.1. Manipulación de servomotor por medio de un *stepper*.



Figura 6. Sombrilla Modelo 3852mat-sspav y base firme.

```
servos_XY §
//control de dos sermotores XY
#include <Servo.h>
Servo x,y;
int sensor1=A2, sensor2=A4, VRX=0, VRY=0;
void setup() {
  x.attach(3);//PINES PWM
  y.attach(5);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
VRX=analogRead(sensor1);
VRY=analogRead(sensor2);
VRX=map(VRX,0,1023,10,170);//RELACIÓN DE LA ENTRADA CON RESPECTO A LA SALIDA
VRY=map(VRY,0,1023,10,170);

x.write(VRX);//10°-170°
y.write(VRY);//10°-170°

Serial.print("EJE X: ");
Serial.print(VRX);
Serial.print("  EJE Y: ");
Serial.print(VRY);
Serial.println();
delay(100);
}
```

Figura 5. Obtención y procesamiento de la información en Arduino.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la figura 6 se visualiza a detalle la base del diseño, para este caso se escogio una base circular con un peso considerable que permite mayor estabilidad, también cuenta en el centro con un elemento tubular de diametro normalizado para que la sombrilla se coloque sin problemas, además se muestra la forma de la sombrilla con la que comunmente se diseñan este tipo de sitemas. Por motivos economicos solo se implementó un prototipo como se observaen la figura 8, el prototipo esta constituido por dos servomotores SG-90 que manipulan los movimientos en (*x, y*) de la sombrilla a escala, en la parte media del tubo se encuentra la tarjeta de arduino y en la parte superior los sensores LDR. En la figura 7 se nota el diseño de la lona imperniable, mientras que en la figura 9 se muestra los motores FR que se emplearán en el diseño real.



Figura 7. Diseño circular de lona impermeable.

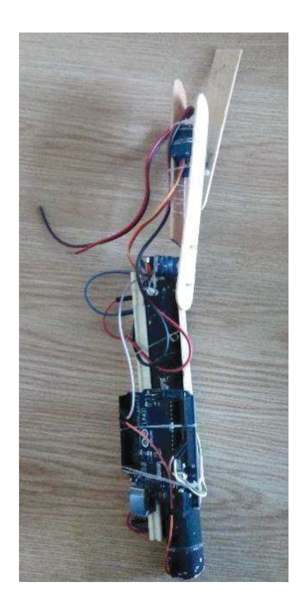


Figura 8. Prototipo de instalación de servomotores.



Figura 9. Servomotor FR para el sistema final.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Resultados

Para la validacion del sistema se hicieron varias pruebas de la simulación con el fin de verificar el funcionamiento del prototipo, los resultados fueron los siguientes: El diseño se somete a ser mejorado con datos y caracteristicas de pruebas ya que depende del lugar y hora en el que se ubique la sombrilla. En la figura 10 se observa la prueba de funcionamiento del protrotipo que se realizo en investigaciones pasadas, en el cual se basa este proyecto, el movimiento mecánico se realiza mediante una inclinacion hacia donde se ecuentra mayor iluminación. Con respecto a la figura 11, el cierre de la sombrilla es de forma manual lo cual no daña el funcionamiento. El diseño se basa en las figuras 10 y 11 para crear un modelo semejante con mejoras en el control y diseño [10]. En la figura 12 se vizualiza el prototipo que se realizó para emular la sombrilla.



Figura 10.-Prueba de movimiento.



Figura 11.-Prueba de cierre.



Figura 12.- Prototipo.



4. Conclusiones

El presente trabajo se desarrolló mediante la metodología QFD, con el objetivo de obtener un diseño que cumpla con los requerimientos obligatorios de lo que el cliente pide. Esta metodología conlleva a identificar las necesidades del cliente con el fin de establecer metas de diseño y evaluar los conceptos adecuados para resolver la necesidad, determinando desde un principio el diseño de la sombrilla que se basa en la incidencia de los rayos del sol. Se utilizó la plataforma de *Arduino*, y *Solidwords* para visualizar las pruebas de movimiento, se alcanzó el objetivo de diseñar conceptualmente un sistema funcional para los usuarios con dos fotorresistores que reciben información a partir de la intensidad de los rayos UV, de acuerdo a esto, los servomotores emplean movimiento de inclinación hacia el lado con más iluminación para hacer que el mecanismo pueda brindar sombra en el área determinada.

Referencias

[1] Medina J. *Simulador 3D para brazo robot de 4 grados de libertad*. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo. 2014.

[2] Aguirre I. *Sistema manipulador antropomórfico de tres grados de libertad*. ITECKNE. 2011.8 (1): 87 – 95.

[3] Molina M. *Diseño y Construcción del Prototipo de un Brazo Robótico con Tres Grados de Libertad, como Objeto de Estudio*. INGENIARE. 2015; 18(1): 87-94.

[4] Saleiro M, Carmo B, Rodrigues JM, du Buf JH. *A low-cost classroom-oriented educational robotics system*. In: Social Robotics. Springer Internacional Publishing. 2013; p. 74–83.

[5] Valera A, Soriano A, Vallés M. *Plataformas de Bajo Coste para la Realización de Trabajos Prácticos de Mecatrónica y Robótica*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial. 2014; 11(3): 363–376.

[6] Busquets J, Busquets JV, Tudela D, Pérez F, Busquets-Carbonell J, Barberá A, et al. *Low-cost auv based on arduino open source microcontroller board for oceanographic research applications in a collaborative long term deployment missions and suitable for combining with.*

[7] Asociación Latinoamericana de QFD (QFDLAT), 2010. [En línea]. México, disponible en: http://www.qfdlat.com/_Que_es_el_QFD_/_que_es_el_qfd_.html [Accesado el día 31 de mayo del 2010].

[8] Reyes F. y Cid J. *Arduino aplicaciones en robótica, mecatrónica e ingenierías*. Alfaomega. México, 2015.

[9] Hernández D.; Barrera D.; Álvarez; Benítez M.; Hernández G. *Diseño conceptual de un dispositivo electrónico de almacenamiento y conteo de monedas*. CIEES, p.p. 1-9, México, 2016.

10] https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-549857600-sombrilla-de-jardin-playa-con-angulo-de-incl-varios-colores-_JM

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 529-538.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Análisis Jacobiano de un Robot Paralelo de 6 grados de Libertad tipo 6-RPR2U Cinemáticamente Redundante

Ramos Alvarado Raymundo y Castillo Castañeda Eduardo

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
Unidad Querétaro

Resumen

Se presenta el análisis Jacobiano de un robot paralelo de 6 grados de libertad con plataforma fija reconfigurable. La matriz Jacobiana es ampliamente usada para el análisis de velocidades y aceleraciones en los robots y para la planificación de trayectorias. Las matrices Jacobianas asociadas a la cinemática directa e inversa fueron obtenidas mediante la implementación del método de ecuación de velocidad de lazo cerrado en una versión modificada. Los resultados se obtienen para un manipulador paralelo tipo 6-RPR2U. Además, se presenta la evaluación del número de condición para validar la actuación redundante propuesta.

Palabras clave: Plataforma fija reconfigurable, Jacobiano directo, Jacobiano inverso, Número de condición.

1. Introducción

Los manipuladores paralelos se usan cada vez más en diversas aplicaciones industriales por su alta capacidad de transporte de carga, buen desempeño dinámico y alta precisión en el posicionamiento. Estos manipuladores consisten en una plataforma móvil que está conectada a una plataforma fija por varias cadenas cinemáticas seriales conocidas como extremidades o piernas. Los manipuladores paralelos se pueden clasificar según el grado de libertad, el número de extremidades, el orden de las articulaciones en cada cadena cinemática y el tipo de actuador [1]. De acuerdo con esto, se han propuesto varios manipuladores paralelos de 6 grados de libertad (GDL). Uno de los manipuladores paralelos de 6-GDL más importantes es el 6-RUS (HEXA) que utiliza articulaciones rotacionales, universales y esféricas en cada brazo, respectivamente. Aunque los robots paralelos ofrecen un numero importante de ventajas respecto a otro tipo de robots manipuladores, también presentan desventajas que afectan directamente su desempeño, por esta razón la mayoría de los robots paralelos pierde la capacidad de alcanzar altas velocidades o aceleraciones como consecuencia de problemas provocados por singularidades que físicamente se traducen en pérdida o ganancia de movilidad en el efector final. Para solucionar este tipo de problemas se han propuesto diferentes soluciones como las estrategias de reconfiguración en donde el análisis de velocidades cumple un papel importante para disminuir los problemas ya mencionados.

El análisis de velocidades en manipuladores industriales es esencial para tareas robóticas como aplicaciones de pintura, soldadura o maquinados en donde es necesario determinar las trayectorias del efector final para velocidades prescritas por cada aplicación. La matriz Jacobiana es un componente crítico para la generación de trayectorias de geometría prescrita en el espacio operacional del efector final. Existen diferentes métodos para calcular la matriz Jacobiana en manipuladores seriales o paralelos, [2] presentó diferentes métodos para calcular la matriz Jacobiana siendo los más destacados el método basado en ecuaciones de velocidad de lazo cerrado y el método basado en teoría de tornillos. Otros autores como [3] y [1] presentaron diferentes métodos para la

ISBN: 978-607-9394-14-1.



deducción y diseño (utilizada en el proceso de síntesis estructural de manipuladores paralelos) de la matriz Jacobiana. Por otra parte, el estudio de los robots paralelos reconfigurables ha incrementado de una manera notable en los últimos años debido al impacto positivo de la actuación redundante en la mejora de los índices de desempeño y en la disminución de problemas como singularidades de cinemática directa e inversa.

En [4] presentaron una actuación redundante como estrategia para mejorar la manipulabilidad cinemática en mecanismos paralelos que con frecuencia contienen un tipo de singularidad inestable que se traduce en la pérdida de la capacidad para contrarrestar fuerzas externas en ciertas direcciones. [5] propuso una estrategia para evitar pequeños espacios de trabajo y singularidades en mecanismos paralelos mediante el uso de una actuación redundante. En [6] presentaron manipuladores paralelos con plataformas reconfigurables que implementan grados redundantes de libertad para mejorar la destreza y el rendimiento. En [7] estudiaron la mejora de la estabilidad del efector final y la reducción de singularidades por medio de redundancia estática y actuación redundante. En [8] se presentó un robot paralelo reconfigurable de 6 grados de libertad que consiste en dos sub-manipuladores paralelos tipo RUS que comparten una plataforma móvil en forma de prisma triangular, este robot presenta una arquitectura similar al robot HEXA propuesto por [9]. La estrategia de reconfiguración propuesta consiste en la variación de parámetros geométricos agregando un mecanismo compuesto por un arreglo de engranes helicoidales cruzados (ver figura 1). De acuerdo con [8] este mecanismo modifica la geometría del robot mediante la inclusión de un grado de libertad al sistema. El eje de giro del engrane (accionado por un actuador rotatorio) localizado en el centro del mecanismo es perpendicular al engrane conectado a cada eslabón de reconfiguración, lo que genera un movimiento angular simultaneo en los eslabones de reconfiguración.

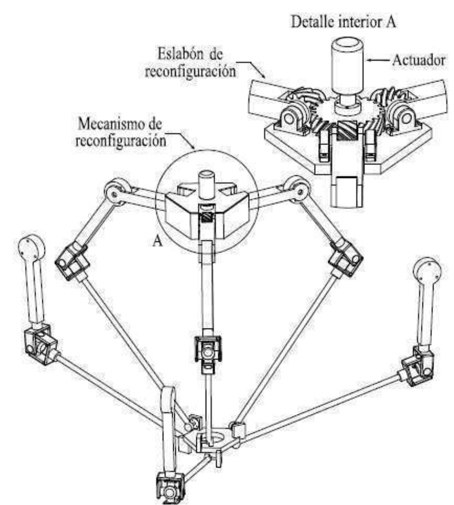


Figura 1. Robot paralelo reconfigurable propuesto por [8].

En [10] se usó una estrategia de reconfiguración con el mismo principio la cual fue propuesta para mejorar los índices de desempeño de un robot paralelo tipo Delta. La variación de los parámetros geométricos de la plataforma fija fue propuesta como una estrategia de reconfiguración por [11] y [12]. En [13] se desarrolló un robot paralelo con dos efectores finales, que puede ser considerado como reconfigurable debido al grado de libertad adicional que presenta en el mecanismo. Un robot paralelo reconfigurable capaz de variar sus grados de libertad de 6 a 5 o 4 o 3 fue presentado por [14], de manera similar en [15] se presentó un robot paralelo con una estrategia de reconfiguración topológica y geométrica que consiste en el uso de una articulación universal reconfigurable y el bloqueo de articulaciones actuadas para variar la movilidad del mecanismo. Una estrategia de reconfiguración para mejorar la rigidez de manipuladores paralelos fue presentada por [16] en donde el robot puede alcanzar diferentes configuraciones sin actuación redundante.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En el presente trabajo se propone el estudio de un robot paralelo de 6 grados de libertad cinemáticamente redundante para mejorar características como la adaptabilidad, la destreza, el espacio de trabajo, la rigidez entre otras. Existen diferentes tipos de estrategias de reconfiguración como la actuación redundante que ha sido ampliamente usada para evitar problemas de movilidad (singularidades de cinemática directa e inversa), también está comprobado por varios autores que la actuación redundante puede incrementar la capacidad de carga útil, la aceleración, mejorar la distribución de las cargas, aumentar el índice de transmisión de fuerza y la rigidez del manipulador.

2. Arquitectura del robot paralelo redundante tipo 6-RPR2U

La arquitectura del robot reconfigurable analizado (ver figura 2) consiste en una plataforma móvil y otra fija unidas por 6 cadenas cinemáticas formadas por un arreglo de 5 articulaciones tipo $RPR2U$ como se muestra en la figura 2. La estructura cinemática del manipulador está basada en el robot HEXA de 6 grados de libertad (GDL) que consiste en una plataforma fija y otra móvil unidas por 6 cadenas cinemáticas seriales tipo RUS. Previamente se realizó la síntesis estructural del mecanismo con la finalidad de obtener un robot paralelo con una plataforma fija reconfigurable. La movilidad del mecanismo fue calculada en trabajos previos mediante la ecuación propuesta por [3] basada en la teoría de transformaciones lineales. El mecanismo propuesto presenta 6 grados de libertad y 6 grados de redundancia.

La estrategia de reconfiguración que será implementada consiste en la variación de las alturas de las articulaciones actuadas respecto a la plataforma fija (mediante una articulación prismática actuada), con el objetivo de incrementar el espacio de trabajo del manipulador.

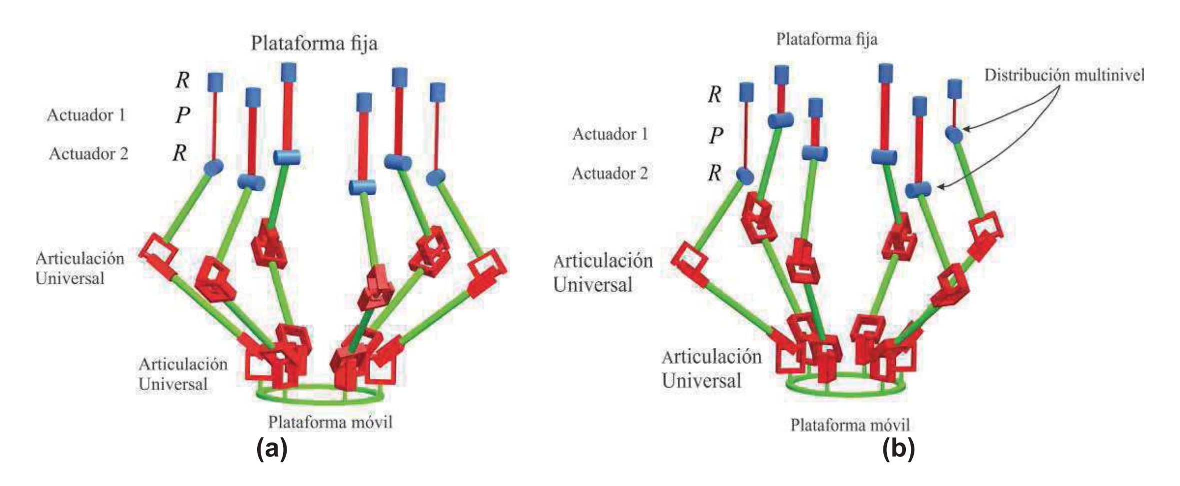


Figura 2. Robot paralelo reconfigurable tipo 6-RPR2U.

[3] estableció que el parámetro estructural de redundancia puede ser usado para agregar articulaciones actuadas en las extremidades de los manipuladores por encima del mínimo necesario para controlar el movimiento de la plataforma fija. Lo anterior se puede observar en el arreglo estructural de la i-ésima extremidad del robot (ver figura 3) que consiste en un arreglo de articulaciones rotacionales, prismáticas y universales. La primera articulación rotacional es pasiva, mientras que la prismática y la segunda rotacional son actuadas.

La arquitectura propuesta presenta ventajas respecto a manipuladores paralelos presentados por [8] y [10] en donde se usó un mecanismo para variar de forma simultánea los parámetros geométricos de la plataforma fija. La ventaja principal es que el mecanismo propuesto en el presente trabajo tiene 6 grados de redundancia, esto permite modificar la altura de las articulaciones actuadas de forma independiente. Además, se propone un arreglo en las extremidades que incluyen

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 529-538.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



articulaciones rotacionales, prismáticas y universales; La primera articulación rotacional permite variar la orientación de la i-ésima extremidad del robot. Lo anterior ayuda a compensar el giro de la articulación esférica usado en los manipuladores paralelos tipo RUS o Delta.

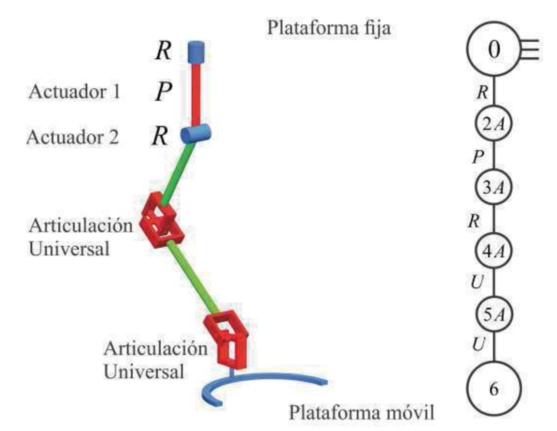


Figura 3. $\boldsymbol{i}$**-ésima extremidad del manipulador paralelo reconfigurable y su grafo asociado.**

3. Análisis Jacobiano

Normalmente los modelos cinemáticos son expresados en términos de velocidad y aceleración del manipulador. El modelo cinemático puede ser directo e inverso. En el modelo cinemático directo el vector de entrada es la velocidad de las articulaciones actuadas y el vector de salida es la velocidad de la plataforma móvil. En el modelo cinemático inverso el vector de entrada es la velocidad de la plataforma móvil y el vector de salida es la velocidad de las articulaciones actuadas. En la cinemática de los manipuladores, la trasformación lineal entre la velocidad de las articulaciones actuadas y la plataforma móvil es definido por la matriz Jacobiana.

3.1 Matrices Jacobianas

En [7] sugirieron la separación de la matriz Jacobiana en dos matrices, una asociada al modelo cinemático directo y la otra asociada al modelo cinemático inverso. Sean las variables de articulación actuadas denotadas por un vector $\boldsymbol{q}$ y la localización de la plataforma móvil descrita por un vector $\boldsymbol{x}$. Las restricciones cinemáticas impuestas por los eslabones pueden ser escritas en forma general como

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

Donde es una función implícita de n dimensiones de $\boldsymbol{q}$ y $\boldsymbol{x}$, y $\boldsymbol{0}$ es un vector cero de n dimensiones. Derivando la ecuación 1 con respecto al tiempo, se obtiene una relación entre velocidades de las articulaciones de entrada y la velocidad de salida en el efector final como sigue

$$J_x\dot{\boldsymbol{x}} = J_q\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2}$$

donde

$$J_x = \frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{x}} \qquad \text{y} \qquad J_q = -\frac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{q}}$$

La derivación anterior produce dos matrices Jacobianas separadas. Por lo tanto, la matriz Jacobiana general puede ser escrita como

$$\dot{\boldsymbol{q}} = J\dot{\boldsymbol{x}} \tag{3}$$



donde $J = J_a^{-1} J_x$. La matriz Jacobiana definida en la ecuación 3 corresponde al Jacobiana inverso de un manipulador serial.

3.2 Matriz Jacobiana convencional

El Jacobiano convencional es usado cuando la velocidad angular de la plataforma móvil (denotada por $\boldsymbol{\omega}_0 = \left[\omega_x, \omega_y, \omega_z\right]^T$) es expresada en términos de sus componentes en el marco de referencia. En este caso, los componentes de velocidad angular no pueden ser asociados directamente con las derivadas respecto al tiempo de los ángulos de rotación de la plataforma móvil. Por esta razón, el Jacobiano convencional no representa una matriz Jacobiana en el sentido matemático estricto. El vector $\boldsymbol{\omega} = \left[\dot{\alpha}, \dot{\varphi}, \dot{\psi}\right]^T = \left[\omega_\alpha, \omega_\varphi, \omega_\psi\right]^T$ puede ser usado para calcular el vector de velocidad angular de la plataforma móvil con respecto a un marco de referencia fijo usando la siguiente expresión

$$\boldsymbol{\omega}_0 = J_r \boldsymbol{\omega} \tag{4}$$

Donde J_r es Jacobiano de mapeo de la velocidad angular. La velocidad angular $\boldsymbol{\omega}_0$ y las velocidades de la plataforma móvil $[\boldsymbol{v}_0, \boldsymbol{\omega}_0]^T = \left[v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z\right]^T$ pueden ser determinados directamente sin calcular $\boldsymbol{\omega}$. Las ecuaciones 2 y 3 pueden ser escritas como

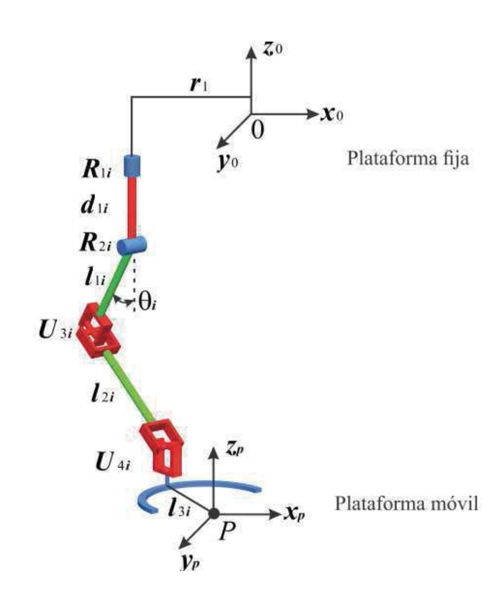
$$J_x \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} = J_q \dot{\boldsymbol{q}} \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_0 \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} = J \dot{\boldsymbol{q}} \tag{6}$$

En este caso $J = J_x^{-1} J_q$. Las matrices J_x, J_q y J representan las matrices Jacobianas convencionales y son calculadas sin las derivadas respecto al tiempo de los ángulos de rotación α, φ y ψ por medio de la formulación de una ecuación de lazo cerrado de cada extremidad.

3.3 Deducción de matriz Jacobiana

La figura 4 muestra el esquema cinemático de la i-ésima extremidad del manipulador. El manipulador analizado es simétrico por lo tanto es posible analizar un lazo cerrado y expandir el análisis para el resto de las extremidades asumiendo que no hay variaciones geométricas y que las extremidades están distribuidas de manera equivalente en la plataforma fija.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 4. Esquema cinemático de la i-ésima extremidad.

Para encontrar la ecuación de lazo cerrado, se sabe que el tamaño del vector de posición U_{3i} a U_{4i} es fijo y es igual a l_{2i}, por lo tanto, puede ser representado como sigue

$$\| {}^{0}\boldsymbol{U}_{4i} \quad {}^{0}\boldsymbol{U}_{3i} \| = l_{2i} \qquad i = 1,2,\dots,6 \tag{7}$$

${}^{0}\boldsymbol{P}_i$ y ${}^{0}\boldsymbol{U}_i$ son vectores de posición de los puntos P_i y U_i desde el centro del sistema de coordenadas $\{0\}$ y son obtenidos mediante las siguientes expresiones

$${}^{0}\boldsymbol{U}_{4i} = {}^{0}\boldsymbol{x}_p + {}^{0}\boldsymbol{R}_p \times {}^{p}\boldsymbol{U}_{4i} \tag{8}$$

$${}^{0}\boldsymbol{U}_{3i} = {}^{0}\boldsymbol{R}_{2i} + {}^{R_{2i}}\boldsymbol{U}_{3i} \tag{9}$$

${}^{0}\boldsymbol{x}_p$ es el vector de posición del centro de la plataforma móvil al origen del marco de referencia fijo y es expresado como

$${}^{0}\boldsymbol{x}_p = [x\ y\ z]^T \tag{10}$$

De acuerdo con la definición de una matriz de rotación, la orientación de la plataforma móvil respecto a la plataforma fija está definida por

$${}^{0}\boldsymbol{R}_p = \begin{bmatrix} c\alpha c\varphi & c\alpha s\varphi & -s\alpha \\ c\varphi s\alpha s\psi - c\psi s\varphi & c\psi c\varphi + s\psi s\alpha s\varphi & s\psi c\alpha \\ s\psi s\varphi + c\psi c\varphi s\alpha & -c\varphi s\psi + c\psi s\alpha s\varphi & c\psi c\alpha \end{bmatrix}^T \tag{11}$$

La ecuación 7 es elevada al cuadrado en ambos lados. Por lo tanto, se obtiene

$$\left({}^{0}\boldsymbol{U}_{4i} - {}^{0}\boldsymbol{U}_{3i} \right)^T \left({}^{0}\boldsymbol{U}_{4i} - {}^{0}\boldsymbol{U}_{3i} \right) = {l_{2i}}^2 \qquad i = 1,2,\dots,6 \tag{12}$$

Reemplazando las ecuaciones 8 y 9 en la ecuación 12, se tiene que

$$\left(\left[{}^{0}\boldsymbol{x}_p + {}^{0}\boldsymbol{R}_p\, {}^{p}\boldsymbol{U}_{4i} \right] - \left[{}^{0}\boldsymbol{R}_{2i} + {}^{R_{2i}}\boldsymbol{U}_{3i} \right]\right)^T \left(\left[{}^{0}\boldsymbol{x}_p + {}^{0}\boldsymbol{R}_p\, {}^{p}\boldsymbol{U}_{4i} \right] - \left[{}^{0}\boldsymbol{R}_{2i} + {}^{R_{2i}}\boldsymbol{U}_{3i} \right]\right) = {l_{2i}}^2 \quad i = 1,2,\dots,6 \tag{13}$$

Derivando la ecuación 13, la ecuación resultante está definida como

$${\boldsymbol{\lambda}_i}^T\, {}^{0}\dot{\boldsymbol{x}}_p + {\boldsymbol{\lambda}_i}^T\, {}^{0}\dot{\boldsymbol{R}}_p\, {}^{p}\boldsymbol{U}_{4i} - {\boldsymbol{\lambda}_i}^T\, {}^{R_{2i}}\dot{\boldsymbol{U}}_{3i} \qquad i = 1,2,\dots,6 \tag{14}$$

$\boldsymbol{\lambda}_i$ está definida por la siguiente ecuación

$$\boldsymbol{\lambda}_i = \left[{}^{0}\boldsymbol{x}_p + {}^{0}\boldsymbol{R}_p\, {}^{p}\boldsymbol{U}_{4i} \right] - \left[{}^{0}\boldsymbol{R}_{2i} + {}^{R_{2i}}\boldsymbol{U}_{3i} \right] \qquad i = 1,2,\dots,6 \tag{15}$$

${}^{R_{2i}}\dot{\boldsymbol{U}}_{3i}$ y la derivada de la matriz de rotación ${}^{0}\dot{\boldsymbol{R}}_p$ pueden ser expresadas como sigue

$${}^{R_{2i}}\boldsymbol{U}_{3i} = l_1 \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \begin{bmatrix} -\sin\theta_i & \cos\theta_{di} \\ -\sin\theta_i & \sin\theta_{di} \\ \cos\theta_i & \end{bmatrix} \tag{16}$$

$${}^{0}\dot{\boldsymbol{R}}_p = \begin{bmatrix} o & -\dot{\alpha} & \dot{\varphi} \\ \dot{\alpha} & 0 & -\dot{\psi} \\ -\dot{\varphi} & \dot{\psi} & 0 \end{bmatrix} {}^{0}\boldsymbol{R}_p \tag{17}$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 529-538.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



La figura 5 muestra la i-ésima extremidad del robot en donde hay una rotación alrededor de z, de esta manera es posible indicar el ángulo θ_{di}.

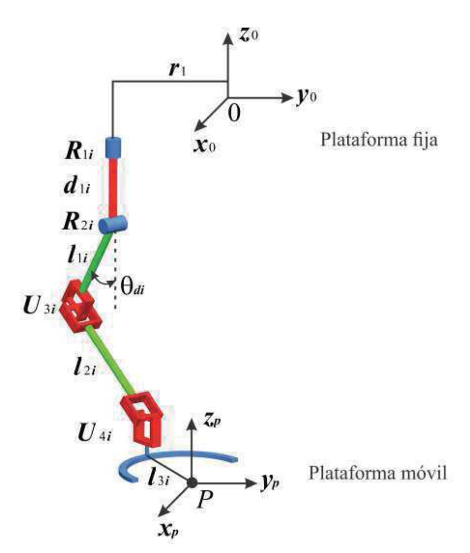


Figura 5. Esquema cinemático de la i-ésima extremidad con rotación alrededor de z.

Reemplazando las ecuaciones 16 y 17 en la ecuación 14, se obtiene

$$\boldsymbol{\lambda}_i^T\ {}^0\dot{\boldsymbol{x}}_p + \left(\left({}^0\boldsymbol{R}_p\ {}^p\boldsymbol{U}_{4i}\right) \times \boldsymbol{\lambda}_i\right)^T \boldsymbol{\omega}_p = \boldsymbol{\lambda}_{qi}\dot{\boldsymbol{\theta}} \qquad i = 1,2,\dots,6 \tag{18}$$

donde λ_{qi}, ${}^0\dot{\boldsymbol{R}}_p$ están definidas como; $\boldsymbol{\omega}_p$

$${}^0\dot{\boldsymbol{x}}_p = [\dot{x}\dot{y}\dot{z}]^T \tag{19}$$

$$\boldsymbol{\omega}_p = \left[\dot{\alpha}\dot{\varphi}\dot{\psi}\right]^T \tag{20}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{qi} = \boldsymbol{\lambda}_i^T l_{1i} \begin{bmatrix} -\sin\theta_i & \cos\theta_{di} \\ -\sin\theta_i & \sin\theta_{di} \\ \multicolumn{2}{c}{\cos\theta_i} \end{bmatrix} \tag{21}$$

Finalmente, la relación entre el vector de velocidad lineal y rotacional de la plataforma móvil $\dot{\boldsymbol{x}}$ y el vector de las articulaciones rotacionales actuadas es obtenido en la siguiente ecuación

$$\boldsymbol{J}_x\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_q\dot{\boldsymbol{q}} \tag{22}$$

donde

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} {}^0\dot{x}_p \\ \omega_p \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \left[\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4\dot{\theta}_5\dot{\theta}_6\right]^T \tag{24}$$

Así mismo, las matrices de coeficientes J_x y J_q son obtenidas de las siguientes ecuaciones

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 42, pp. 529-538.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$\boldsymbol{J}_x = [L_1 L_2 L_3 L_4 L_5 L_6]^T \quad (25)$$

$$\boldsymbol{L}_i = \left[\lambda_i{}^T \left(\left({}^0R_P \, {}^pU_{4i} \right) \times \lambda_i{}^T \right) \right] \quad (26)$$

$$\boldsymbol{J}_q = diag\left[\lambda_{q1} \lambda_{q2} \lambda_{q3} \lambda_{q4} \lambda_{q5} \lambda_{q6}\right] \quad (27)$$

La matriz Jacobiana es obtenida considerando las ecuaciones 25 – 27 y sustituyendo en la ecuación que se muestra a continuación

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{J}_a{}^{-1} \boldsymbol{J}_x \quad (28)$$

3.4 Actuación redundante

En [5] se definen los robots paralelos accionados redundantemente cuando el número de grados de libertad del manipulador es mayor al grado de actuación, por lo tanto, el manipulador paralelo presentado en este trabajo puede ser actuado redundantemente, el grado de redundancia de actuación está definido como sigue

$$\boldsymbol{\rho_\alpha = M - \alpha} \quad (29)$$

donde M es la movilidad del manipulador y α es el grado de actuación.

En el manipulador paralelo propuesto es posible eliminar los grados de redundancia bloqueando las articulaciones prismáticas, con esta consideración la matriz Jacobiana no sufre alteraciones. Por otro lado, es posible agregar una matriz que representa la activación de las articulaciones pasivas (los pares prismáticos del manipulador 6-RPR2U), en este caso las articulaciones primaticas sólo afectan directamente aquellas variables que actúan en z. Lo anterior puede ser escrito como

$$\boldsymbol{J}_x S_{iz} = [L_1 L_2 L_3 L_4 L_5 L_6]^T \, S_{iz} \quad (30)$$

$$\boldsymbol{J}_q S_{iz} = diag\left[\lambda_{q1} \lambda_{q2} \lambda_{q3} \lambda_{q4} \lambda_{q5} \lambda_{q6}\right] S_{iz} \quad (31)$$

Donde S_{iz} modifica los valores de aquellas variables que actúan en z, y está definido por la dimensión del par prismático que es actuado redundantemente.

4. Número de condición de la matriz Jacobiana

Existen diferentes índices que permiten evaluar el desempeño del manipulador como el número de condición, mínimo valor singular, índice de transmisión de velocidad, índice de destreza, índice de manipulabilidad, etc. El número de condición de la matriz Jacobiana puede representar cuantitativamente la estabilidad la operación de inversión de la matriz, además puede ser usado para medir la destreza del manipulador.

El número de condición de la matriz J está definido como la relación de los valores máximos y mínimos de los valores singulares y puede ser expresado como

$$C = \frac{s_{máx}}{s_{min}} \quad (32)$$

De acuerdo con [3], si **J** es una matriz $m \times m$, el número de condición de la matriz Jacobiana J puede ser expresado como el producto de las normas de J y J^{-1}.

$$C = |J||J^{-1}| \quad (33)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



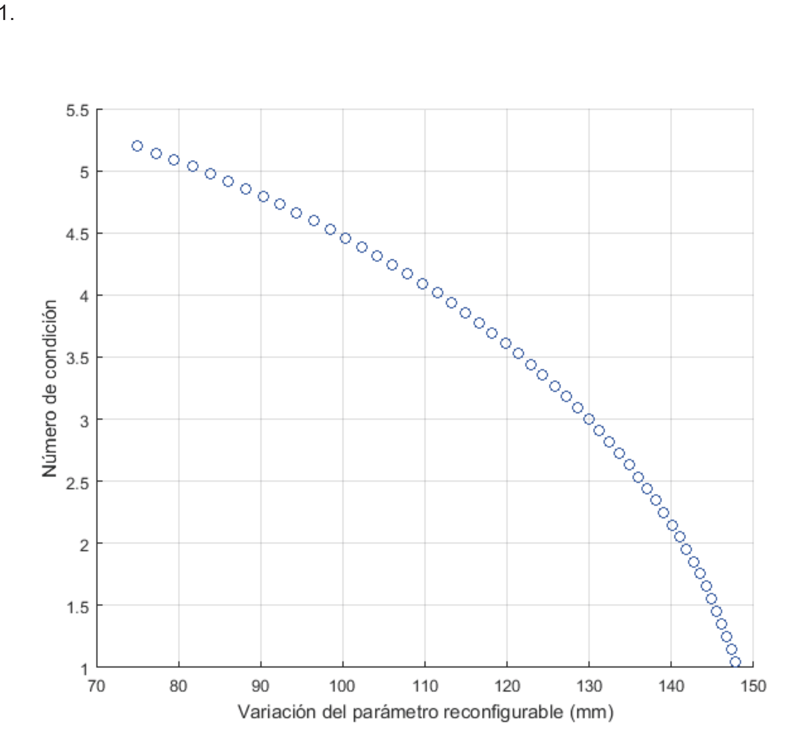


Figura 6. Evaluación del número de condición con la variación del parámetro d_{1i}.

De acuerdo con [3], un manipulador es isotrópico cuando el número de condición de la matriz Jacobiana es igual a la unidad. La figura 6 muestra el número de condición cuando el parámetro d_{1i} es variable, se observa que el manipulador alcanza una configuración isotrópica cuando el valor de d_{1i} se acerca a su valor máximo. Para algunas configuraciones el número de condición puede alcanzar valores infinitos que físicamente representan singularidades, por lo tanto, este índice de desempeño puede ser utilizado para medir la cercanía a una configuración singular del robot.

5. Conclusiones

La arquitectura del manipulador propuesto difiere de otras presentadas por otros autores. La diferencia principal son los grados de redundancia que exhibe, los cuales pueden ser accionados logrando una distribución multinivel de la plataforma fija en donde cada extremidad puede ser reconfigurada de forma independiente sin que la movilidad del manipulador sea afectada.

La deducción de la matriz Jacobiana es esencial en el estudio de mecanismos paralelos debido a su gran utilidad. Con el cálculo del Jacobiano del robot paralelo de plataforma fija reconfigurable es posible expandir el análisis de este para evaluar diferentes índices de desempeño que permitirán culminar el proceso de síntesis estructural para encontrar la mejor solución de las arquitecturas basadas en el robot HEXA.

La matriz Jacobiana es una herramienta poderosa para calcular las singularidades de cinemática directa e inversa, y aunque el análisis resulta obvio para algunos manipuladores es posible determinar analíticamente las posiciones en donde el efector final sufre alteraciones en su movilidad.

Los grados de redundancia de actuación pueden ser utilizados como estrategia de reconfiguración para evitar configuraciones singulares dentro del espacio de trabajo del manipulador. Lo anterior fue demostrado con la evaluación del número de condición, en donde el manipulador es isotrópico cuando las variables actuadas redundantemente se acercan a sus valores máximos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Como trabajo a futuro se plantea analizar otras arquitecturas de robots paralelos reconfigurables propuestas en un proceso de síntesis estructural que fue realizado previamente para encontrar la mejor arquitectura en términos de su desempeño evaluando los índices cinetostáticos y las singularidades que se presentan dentro del espacio de trabajo. Lo anterior es considerado porque cada arquitectura está compuesta por diferentes arreglos en sus extremidades que incluyen articulaciones prismáticas, rotacionales y universales.

Referencias

[1] Merlet,J.P.: Parallel robots. Second edition. Springer. (2006).
[2] Tsai,Lung-Wen.: Robot analysis. John Wiley & Sons, Inc. (2006).
[3] Gogu, Grigore: Structural synthesis of parallel robots. Springer. (2008).
[4] O'Brien, J. Wen, J.: Redundant actuation for improving kinematic manipulability. IEEE International Conference on Robotics & Automation. (1999).
[5] Muller, Andreas: Redundant actuation of parallel manipulators. Parallel manipulators, towards new applications. (2008).
[6] Mohamed, M., Gosselin, C.: Design and analysis of kinematically redundant parallel manipulators with configurable platforms. IEEE Transactions on Robotics. Vol.21, No. 3. (2005).
[7] Gosselin, C. Angeles, J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Volume: 6, Issue: 3, Jun 1990.
[8] Sánchez-Alonso, R., González Barbosa, J.J., Castillo-Castañeda, E.: Análisis cinemático de un novedoso robot paralelo reconfigurable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 13. (2016) 247-257.
[9] Pierrot, F., Dauchez, P., Fournier, A.: HEXA: A fast six-DOF fully-parallel robot. Advanced Robotics, 'Robots in Unstructured Environments'. (1991).
[10] Balmaceda, A. L., Castillo, E.: A Reconfiguration Strategy of a Parallel Delta-Type Robot to Improve the Kinematic Performance. Robotics and Mechatronics. Springer. (2008). 111-119.
[11] Xi, F., Li, Y., Wang, H.: A module-based method for design and analysis of reconfigurable parallel robots. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. (2010).
[12] Bi, Z.M., Kang, B.: Enhancement of adaptability of parallel kinematic machines with adjustable platform. Journal of Manufacturing Science and Engineering. (2010).
[13] Hoevenaars, A.G.L., Gosselin, C., Lambert, P., Herder, J.L.: A systematic approach for the Jacobian analysis of parallel manipulators with two end effectors. Mechanism and Machine Theory. (2017).
[14] Xi, F. Xu, Y. Xiong, G.: Design and analysis of a reconfigurable parallel robot. Mechanism and Machine Theory. (2006).
[15] Finistauri, A.D., Xi, F.: Reconfiguration analysis of a fully reconfigurable parallel robot. Journal of Mechanics and Robotics. (2013).
[16] Moosavian,A. Xi, F.: Design and analysis of reconfigurable parallel robots with enhanced stiffness. Mechanism and Machine Theory. (2014).
[17] Guo,J., Liu, Y., Shi, J., Cai, G. : Analysis on the processing dexterity of 3_UPS parallel robot. International Conference on Automation and logistics. Qingdao, China. (2008).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Bicibomba

Josué Martínez-Tello e Iván Eduardo Andrade-Jains

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, C.P. 76230.
josuemt357@gmail.com

Resumen

En la actualidad, la importancia del desarrollo sustentable para el cuidado del medio ambiente se vuelve imprescindible, por ello proponemos un mecanismo para promover el reciclaje. En esta ocasión presentamos una bicibomba. Su uso no requiere de energía eléctrica, si no del movimiento mecánico producido por una bicicleta a fin de bombear agua. El desarrollo de nuestro mecanismo consiste en un dispositivo fácil de usar y de construir, que a su vez este dotado de robustez mecánica a fin de garantizar que el dispositivo sea seguro para el usuario final. Primeramente, se realizaron varios prototipos y cada uno de ellos probado para elegir el modelo que sería más óptimo. Realizando un modelado mecánico vemos como es el comportamiento de nuestro dispositivo. Dados los resultados se realizan ajustes al dispositivo y se somete a pruebas a fin de comprobar su correcto funcionamiento.

Palabras clave: Bicibomba, medio ambiente, reciclaje, agua.

1. Introducción

En la actualidad es imprescindible desarrollar alternativas para el ahorro de energía para reducir costos y de alguna manera cuidar el medio ambiente. Por ello, nosotros presentamos el desarrollo de un prototipo de bicibomba, el cual, aprovecha el movimiento rotacional producido por una bicicleta aplicado a la parte mecánica de una bomba de agua. De este modo se obtiene el bombeo de agua sin necesidad de usar electricidad o alguna fuente de combustible fósil.

El desarrollo de las llamadas bicimáquinas comienza en 1997, con Carlos Marroquín, originario de Guatemala. El proyecto de bicimáquinas comienza cuando un grupo de canadienses, bajo el nombre de Pedal, ven sus máquinas y proponen a Carlos Marroquín trabajar juntos para ayudar a la población. Para 1998, se conforma la Asociación Maya Pedal. En 2001 se constituye la ONG “Maya Pedal” como herencia de Pedal. Durante este tiempo se desarrollan más bicimáquinas. En diciembre de 2004, Marroquín fue invitado por Bikes not Bombs para participar en una conferencia en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) [1]. En 2010, Carlos Marroquín recibe el prestigioso Curry Stone Design Prize por sus innovaciones tecnológicas [2]. En ese mismo año se funda la Escuela de Tecnologías Apropiadas, “Bici-Tec”. Actualmente, muchos de estos avances desarrollos se han usado en distintas partes del mundo debido a su practicidad. En México existen asociaciones dedicadas a este rubro como lo es “Bicimáquinas” originaria de Guadalajara. En Querétaro se han desarrollado dispositivos en la Universidad Tecnológica de Querétaro (UTEQ). En la Universidad Nacional Autónoma de México se desarrollan prototipos en la Unidad de Ecotecnologías del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES-UNAM). Nuestro caso es similar; nace de proponer soluciones a comunidades rurales por lo que en la actualidad se trabaja con la Coordinación de Proyectos Rurales de la Dirección de Vinculación Social de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El presente trabajo trata acerca del modelado de nuestro dispositivo a fin de garantizar que se aproveche de manera óptima la energía y poder darle al usuario final un producto que le sirva. El modelado realizado nos ayuda a decidir si la estructura es la correcta.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Construcción del dispositivo

El desarrollo de nuestro prototipo ha pasado por varios modelos los cuales se probaron a fin de definir cuál sería un modelo o generar otra propuesta. Una vez definido el modelo se procedió con el análisis de éste para rediseñar el dispositivo. Una vez terminada la parte mecánica, se buscó implementar la instrumentación para medir variables significativas como es el flujo de agua, velocidad y cantidad de agua.

2.1 Propuesta de modelos

Para la construcción del modelo, primero se planteó el modelo dinámico producido por la bicicleta, el cual, es basado en un sistema de transmisión de cadena, el cual genera el movimiento circular de la llanta e impulsar el movimiento.

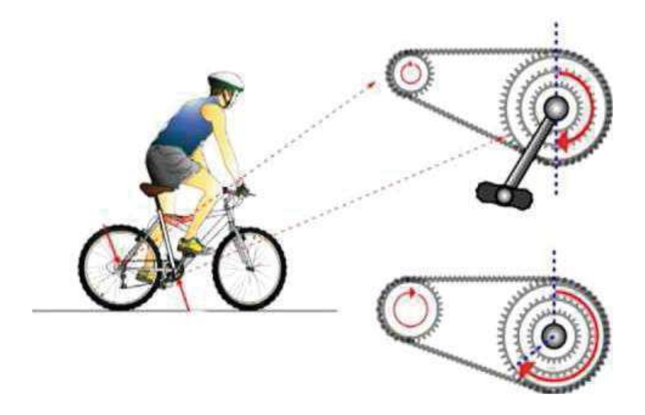


Figura 1. Movimiento generado por el pedal.

Con esta idea se planteó el rediseño mecánico del dispositivo, ya que en anteriores veces solo se habían construido algunos otros prototipos y se lograba la puesta en funcionamiento, sin pasar por un modelado, dando pie a dar un modelado formal. Para el modelado se planteó primero el movimiento del pedal para obtener la relación de transmisión.

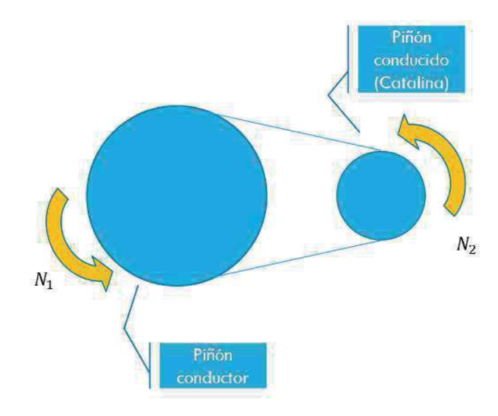


Figura 2. Relación de transmisión de movimiento la catalina hacia los piñones mediante la cadena.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2} \tag{1}$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Tenemos entonces que:

$$N_P = \frac{N_C Z_C}{Z_P}\ rev/s \tag{2}$$

Donde:
N_P = Velocidad del piñón rev/s
N_C = Velocidad de la catalina rev/s
Z_C = Número de dientes de la catalina
Z_P = Número de dientes del piñón

Después, para el modelado de la bomba con respecto del movimiento de la llanta, tenemos lo siguiente:

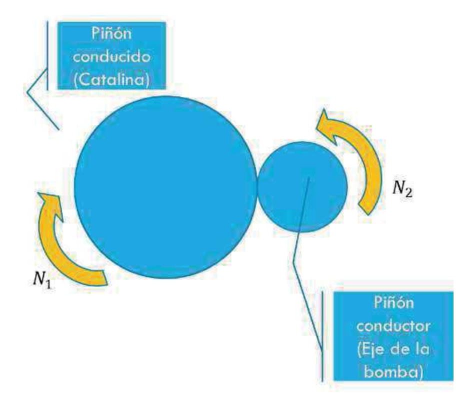


Figura 3. Relación de transmisión de movimiento de la llanta hacia el eje de la bomba de agua.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2} \tag{3}$$

Por lo que tenemos que:

$$N_R = \frac{N_P D_r}{D_R}\ rev/s \tag{4}$$

Donde:
N_R = Velocidad del rotor rev/s
D_r = Diámetro de la rueda
D_R = Diámetro del rotor

Sustituyendo N_P:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$N_R = \frac{N_C Z_C D_r}{Z_P D_R}\ rev/s \qquad (5)$$

Después se buscó la relación de velocidad del rotor y los litros bombeados. Para ello tenemos diferentes tipos de bombas que van de acuerdo según la dirección del flujo a la salida del rodete, estas bombas son:

- Bombas centrífugas (perpendicular al eje)
- Bombas hélice (flujo paralelo al eje)
- Bombas helicocentrífugas (flujo mixto).

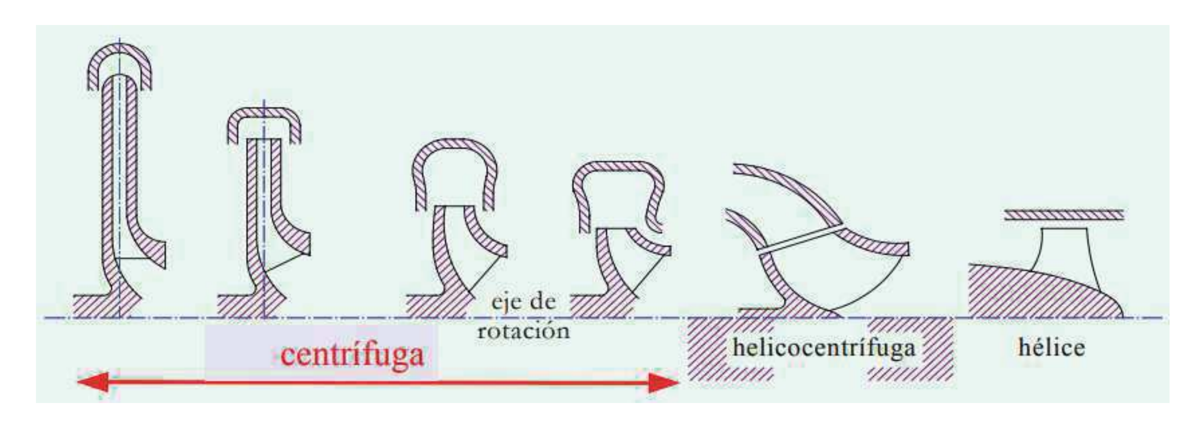


Figura 4. Tipos de bombas de agua.

Según el tipo de bomba utilizada, será la velocidad especifica requerida para bombear un caudal Q a una altura H. Las bombas se dividen por su número de revoluciones específico, constituyendo su estudio la base para determinar series de rodetes y catálogos con las características de interés en la construcción de bombas. El número de revoluciones específico viene considerado por el número de revoluciones que porta la bomba semejante que se considere prototipo y que impulse un caudal de 1m3/s obteniendo una altura de bombeo manométrica de 1m. La obtención de este número parte de la ecuación de semejanza:

$$\eta_q = \frac{\eta \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \qquad (6)$$

Donde:

Ƞq = Velocidad especifica de la bomba
Ƞ = Velocidad del rotor rpm
Q = Caudal m^3/s
H = Altura m

Se convierten los rpm a rev/s

$$\eta_q = \frac{60N_R \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \rightarrow H^{\frac{3}{4}} \cdot \eta_q = 60N_R \cdot Q^{\frac{1}{2}} \rightarrow Q^{\frac{1}{2}} = \frac{H^{\frac{3}{4}} \cdot \eta_q}{60N_R} \qquad (7)$$

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



De m[3]/s a lt/s

$$Q = \frac{H^{\frac{3}{2}} \cdot \eta_q^2}{3600 N_R^2} \cdot 1000 \rightarrow Q = \frac{5}{18} \frac{H^{\frac{3}{2}} \cdot \eta_q^2}{N_R^2}\ lt/s \qquad (7)$$

2.2 Instrumentación del dispositivo

Para poder medir la cantidad de agua, así como la velocidad del dispositivo, se procedió a la implementación de un sensor de flujo de agua, así como de un sensor de efecto Hall para medir la velocidad del dispositivo.

2.2.1 Sensor de flujo de agua

Este sensor se acopla muy bien a la tubería de agua de cualquier edificio o casa y contiene un sensor de molino para medir la cantidad de líquido que ha pasado a través de él. También tiene un sensor magnético de efecto Hall que emite un impulso eléctrico con cada revolución. El sensor de efecto Hall está sellado para permanecer seguro y seco. El sensor viene con tres cables: rojo (energía 5-24VDC), negro (tierra) y amarillo (salida de pulsos de efecto Hall).

2.2.2 Sensor de efecto Hall

El efecto Hall es una tecnología de estado sólido que no emplea contactos movibles. La conexión magnética es más confiable que los sistemas que dependen de contactos deslizables y resistores variables. Se fundamenta en el hecho de que un imán desvía el flujo de electrones que se mueve a través de un semiconductor. El voltaje radiométrico de salida puede convertirse a frecuencia, a una señal de PWM, o puede ser enviado como un patrón de pulsos digitales, lo cual facilita el uso de sistemas basados en microcontroladores que utilizan transceivers de diversos protocolos para la transmisión de datos y su posterior procesamiento y despliegue[3].

2.3 Modelo de la nueva estructura

Para la construcción de la nueva estructura, se tomó en cuenta el modelado realizado, así como la construcción de los modelos previos, los cuales, ya funcionaban, pero no tenían un modelado.



Figura 5. Modelo de bicibomba móvil.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 6. Modelo de bicibomba estacionaria.

Para el desarrollo del nuevo modelo, se opto por seguir usando un modelo similar al modelo de la bicibomba móvil (figura 5), debido a que no se tiene que realizar ninguna modificación a la bicicleta. Se le añadió una extensión a la base para darle mayor estabilidad. Esto es debido a que hacemos que el centro de masa este mas cerca del suelo, lo que permite mayor equilibrio a los modelos anteriores.

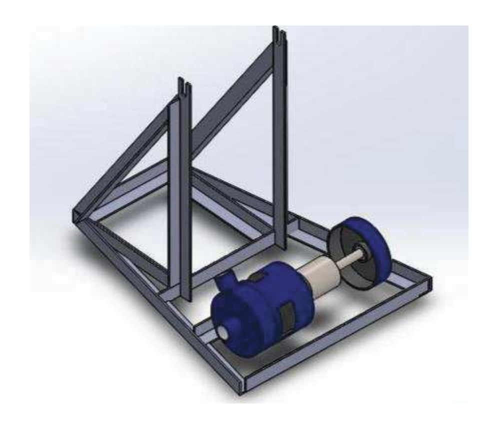


Figura 7. Modelo de la bicibomba.



Figura 8. Modelo de la bicibomba con montaje de la bicicleta.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



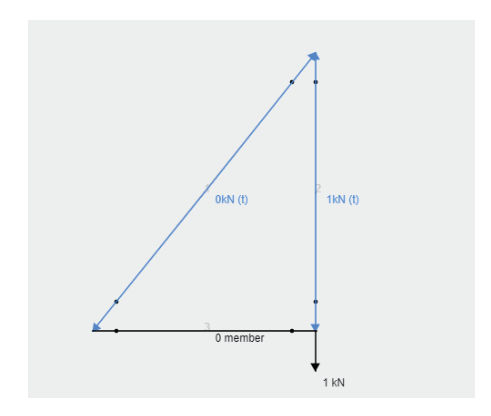


Figura 9. Diagrama de Cuerpo libre del modelo.

2.4 Modelo de la nueva estructura

Para la construcción del modelo se opto por usar perfil metálico de 1” debido a su facilidad de manejo. Se reutilizo una bomba de agua, a la cual, ya no le funcionaba el estator. Para unir las piezas se optó por soldar, debido a que las uniones con tornillos corrían el peligro de desajustarse debido a las vibraciones provocadas por el movimiento de la bicicleta.



Figura 10. Construcción de la base.



Figura 11. Base de la bicibomba terminada

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 12. Montaje de la bicicleta en el dispositivo.

2.5 Implementación de los sensores

2.5.1 Tarjeta Arduino

La tarjeta Arduino es una de las tarjetas más comerciales y sencillas de usar que hay en el mercado debido a su facilidad de programación. El modelo de la tarjeta que se utilizó fue Arduino Uno, debido a que es la tarjeta de las más simples y los requerimientos del microcontrolador ATmega328p no eran de mucha exigencia. Sus características la hacían idóneas, para hacer la medición de flujo, por ejemplo, el ADC el cual es de 8 bits, y nos sirve para realizar la medición ya que no requieren tanta precisión. Algunas de sus características son las siguientes:

- Voltaje de operación 5V
- Pines para entrada- salida digital: 14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Memoria Flash 32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
- Frecuencia de reloj 16 MHz
- ADC hasta 10 bits

2.5.2 Implementación de sensores

Para el sensor de flujo de agua, primero se calibro para obtener las mediciones. Si se requiere más de 10% de precisión se recomienda hacer el proceso de calibración. Incluso si no se requiere es buena práctica realizarlo para mejorar el desempeño y revisar que todo se encuentre funcionando correctamente. Además de que no requiere de mucho tiempo. Lo que se realizo fue conseguir una tasa de medición y realizar pruebas para ver cuántos pulsos se miden con cierto volumen de agua. Esto se repite varias veces y se obtiene un promedio.
Para obtener los pulsos simplemente podemos se cargó este programa al Arduino:

```
volatile int pulsos; // Cantidad de pulsos del sensor. Como se usa dentro de una interrupcion debe ser
volatile
#define sensorDeFlujo 2 //Pin al que se conecta el sensor. DEBE ser 2 porque es unico que acepta
interrpciones en el Arduino UNO

void flujo () // Funcion de interrupcion
{
 pulsos++; // Simplemente sumar el numero de pulsos

}
void setup()
{
 pinMode(sensorDeFlujo, INPUT);
```

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



```
 Serial.begin(9600);
 attachInterrupt(0, flujo, RISING);
 interrupts();
}
void loop ()
{
 Serial.print("Pulsos: ");
 Serial.println(pulsos);
}
```

Lo que hará el programa es simplemente desplegar la cantidad de pulsos en el Serial Monitor.

La colocación del sensor fue a la entrada de la bomba de agua, para monitorear el flujo.

En el caso del sensor de efecto Hall, se coloco en el rotor para obtener la relación de velocidad con la cantidad de agua. Para este último sensor se implementó el siguiente código:

```
volatile int NbTopsFan;
int Calc;
int hallsensor = 2;
void rpm ()
{
  NbTopsFan++;
}
void setup()
{
  pinMode(hallsensor, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, rpm, RISING);
}
void loop ()
{
  NbTopsFan = 0;
  sei();
  delay (1000);
  cli();
  Calc = (NbTopsFan * 60 / 5.5);
  Serial.print (Calc, DEC);
  Serial.print (" Litros/min\r\n");
}
```

3. Resultados

3.1 Estructura

De la nueva estructura se obtuvieron los siguientes resultados:

- Mejoría en la estabilidad
- Fácil construcción
- Rendimiento de material

También con este modelado se realizó el primer manual de construcción de este dispositivo, con el fin de promover este dispositivo. Para la cuestión del manual, se optó por usar solo un tamaño de bicicleta, el cual fue de una rodada 24”, para que sirviera de base para realizar las modificaciones a este y hacerlo para diversos tamaños.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 43, pp. 539-551.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Al conectar la válvula check, también conocida como pichancha, se encontró que debe estar a una distancia cerca del nivel de agua, para que, al momento de purgar la bomba, se use un mínimo de agua.

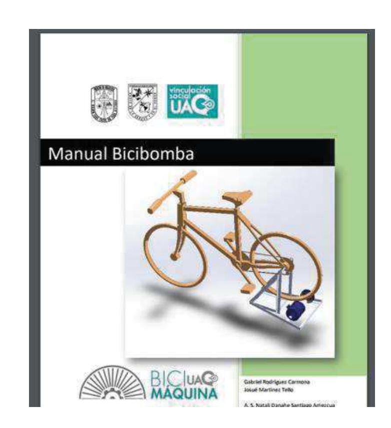


Figura 13. Manual de construcción de bicibomba.

3.2 Funcionamiento de los sensores

Se corrió el programa y se vertió agua para que pase completamente por el sensor y anotamos la cantidad de pulsos. Esto se puede repetir varias veces con distintas cantidades de agua. Nosotros realizamos 3 pruebas con 500ml y 3 pruebas con 1000ml y los resultados son bastante evidentes.

Prueba No.	Cantidad	Pulsos
1	500 ml	209
2	500 ml	196
3	500 ml	199
4	1000 ml	385
5	1000 ml	390
6	1000 ml	398

Tabla 1. Resultados del sensor de flujo de agua.

Podemos entonces inferir que por cada litro de agua que pasa por el sensor obtenemos aproximadamente 400 pulsos. Lo redondeamos por simplicidad. Si se requiere mucha precisión es importante cuidar que la cantidad de agua vertida sea siempre la misma.

Por lo tanto, concluimos que:

400 pulsos = 1 Litro

Para calcular el flujo requerimos entonces cuantos Litros/segundo están pasando por el sensor. Tomando en cuenta lo que determinamos anteriormente entonces sabemos que si pasa 1 Litro en 1 minuto tendíamos 400 pulsos/min. Lo dividimos entre 60 para convertirlo a segundos y tenemos 6.67 pulsos/s.

Entonces:



$$400\ pulsos/min\ =\ 1\ Litro\ /\ min$$

$$6.67\ pulsos/seg\ =\ 1\ Litro\ /min$$

$$6.67\ Hz\ =\ 1\ L/min$$

Esto quiere decir que si tenemos el número de Hz simplemente lo dividimos entre 6.67 para obtener el número de L/min.

$$Q\ (L/min)\ =\ f\ /\ 6.67$$

3.3 Pruebas

Una vez realizada la calibración se pasó a realizar el programa de Arduino que nos ayudara a obtener los litros por minuto que pasan por la tubería, al realizar el código y las conexiones pertinentes se hicieron pruebas vertiendo agua en el sensor.



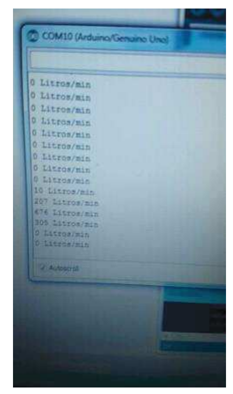


Figura 14. Pruebas del sensor.

3.4 Pruebas obtención de agua

Para el análisis de como era el comportamiento de la bicibomba se probo la cantidad de agua en litros obtenida durante un minuto.

Prueba	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s	60 s
1	2.7	5	10.2	12	14	15
2	3	6.2	9.8	13.4	15.6	18.3
3	0.8	1.6	2.8	3.6	4.3	5.2
4	1.2	2.9	3.5	4.8	6.2	8.1
5	0.7	1.3	1.7	2.2	2.7	3.4
6	0.8	1.5	2.1	2.9	3.2	3.8
7	1.1	2.5	3.4	4.7	5.6	6.45
8	0.8	1.5	2.4	3.3	4.1	5.1
9	0.3	1.1	1.7	2.6	3.8	4.3
10	0.7	1.5	2.7	3.6	4.9	6.1

Tabla 2. Resultados obtenidos de las pruebas de bombeo.

ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 14. Gráfica de los resultados de la tabla 2.

Al analizar los resultados obtenido vemos que la cantidad final promedio de las pruebas 3 a la 10, es de 5.3 litros/minuto. Esto va en relación al sistema de transmisión que, al tener diferentes arreglos en el sistema de cambios, se obtienen resultados diferente. Un factor muy importante que no se había considerado fue, que si se mantiene una sola relación con respecto a la catalina y a los piñones en el sistema puede cambiar, según las condiciones físicas del usuario, ya que, si tenemos aun usuario que es de alto rendimiento, puede obtener más agua que un usuario que no esté acostumbrado a realizar alguna actividad física.

Esto nos lleva a generar una nueva estrategia para la mejora del dispositivo, a fin, de garantizar al usuario que se obtendrá una cantidad de agua considerable.



Figura 15. Pruebas de bombeo con el dispositivo.

4. Conclusiones

Se obtuvo un buen rendimiento del nuevo modelo con respecto de los modelos anteriores, el cual, propiamente tuvo su diseño y modelado. El rendimiento es uno de los próximos objetivos debido a que la fuerza ejercida por la llanta hacía el eje del rotor era mucha y de este modo no permitía que este girará como se deseaba. Esto se vio reflejado en los resultados, ya que, en ocasiones para diferentes usuarios, les costaba trabajo pedalear, había un mayor desgaste físico del usuario y se obtenía poca agua. Por ello, se tiene como próximo objetivo diseñar un soporte para el rotor que nos permita que este gire de mejor manera y evitar dañar los rodamientos y causar un mayor desgaste. Con este nuevo diseño, se implementará un sistema de seguridad a fin de garantizar al usuario que no hay riesgo al usar la bicibomba, ya que, para este modelo, no se había contemplado estas consideraciones de seguridad.



Para la parte de instrumentación del dispositivo se optó por usar en este momento por Arduino, ya que es una plataforma muy sencilla de usar. Se tiene como objetivo usar la tarjeta NóMADA, a fin de presentar próximamente una instrumentación más robusta y de buen alcance para el usuario.

El manual de construcción es práctico, pero le faltan algunos datos técnicos, por lo que ya se está trabajando en la mejora de éste, a fin de que cuente con una cobertura para los diversos tamaños de bicicletas, posición de la bomba, así como de la válvula check.

Actualmente, ya se está trabajando en un nuevo diseño, el cual contará con sistemas de seguridad para el usuario, así como de tomar en cuenta la ergonomía del dispositivo y hacerlo más cómodo y seguro para nuestro usuario final. El nuevo diseño surge en respuesta de que no solo las comunidades rurales gustaron del dispositivo, si no en la zona urbana hubo una inquietud por adquirirlo.

Referencias

[1] Olson, M. *Reusing bike parts to power water pumps, corn crushers and more*. http://www.theecologist.org/campaigning/recycling_and_waste/532101/reusing_bike_parts_to_power_water_pumps_corn_crushers_and_more.html

[2] Curry Stone Design Prize. *Can bicycles anchor business?.* http://currystonedesignprize.com/winners/maya-pedal/

[3] Rodríguez-Alonso, E. J., Aceves-Fernández, M. A., Ramos-Arreguín, J. M., Tovar-Arriaga, S., Pedraza-Ortega, J.C. & Vargas-Soto, J.E. "*Propuesta de un Sistema Embebido Inalámbrico para Monitoreo de un Sensor de Efecto Hall para Aplicaciones Domésticas".* 12º Congreso Nacional de Mecatrónica. Asociación Mexicana de Mecatrónica, A.C. León, Guanajuato, México. 2013.

[4] Estimation of Pedaling Torque for Electric Power-assisted Bicycle on Slope Environment. IEEE.

[5] Bum in Zone: Real Time Heart Rate Monitoring for Physical Activity. IEEE.

[6] Enhanced MG with Optimum Operational Cost of Pumping Water Distribution Systems. IEEE.

[7] Context-sensitive, first-principles approach to bicycle speed estimation. IET.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 552-565.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Co-Simulación de un Robot Delta para Control

Verde-Lampon Jonathan, Gudiño-Márquez Jorge W., Gudiño-Lau Jorge, Alcalá-Rodríguez Janeth, Charre-Ibarra Saida y Durán-Fonseca Miguel

Facultad de Ingeniería Electromecánica.
Universidad de Colima
Km. 20 carretera Manzanillo-Barra de Navidad
Manzanillo, Colima
E-mail: jgudino1@uco.mx, jglau@ucol.mx,janethalcala@ucol.mx,
scharre@ucol.mx, mduran@ucol.mx

Resumen

Este trabajo presenta la co-simulación como una herramienta de apoyo para simulación y control de robots paralelo tipo delta, con el objetivo de validar los mecanismos y algoritmos de control antes de llevarlos a la validación experimental. Se diseña una plataforma de co-simulación que tiene un robot paralelo con el apoyo de los softwares Solidwork, Maple y Matlab. El empleo de Solidwork permite hacer un análisis y validación del modelo cinemático y dinámico del robot delta y para resolver el problema de control del robot se utiliza Matlab y Adams. Se eligieron estos programas debido a que son más comerciales y casi en todas las Universidades lo tienen. Además, se describe como se aplicada la co-simulación para hacer un ambiente virtual, y como se unen los eslabones y las articulaciones hasta forma el robot paralelo tipo delta, por lo anterior, la co-simulación ayuda al diseño de robots y a al control, ya que se necesitan validar los algoritmos de control en co-simulación antes de llevarlos a la validación experimental y no dañar el equipo experimental.

Palabras clave: Cosimulación, diseño mecánico, robots paralelos, modelado de robots y control.

1. Introducción

Muchos de los avances tecnológicos en la co-simulación son producto de la necesidad de mejorar y complementar técnicas de control que permitan obtener resultados de manera más acertada y veras, en esta investigación se redactan los avances y desarrollos más sobresalientes obtenidos hasta el momento en la literatura.

En 2007 se introduce un método de co-simulación propuesto en [1] para resolver con precisión la dinámica de un robot TPT 3 paralelo, la ecuación de la dinámica de los sistemas de acoplamiento es dispuesta por la ecuación de Lagrange, sin embargo, resulta muy complejo y difícil deducir una solución numérica, por lo que el método de la co-simulación con ADAMS y ANSYS es propuesto, la dinámica se cumple en el análisis de ADAMS y el esfuerzo en ANSYS. Esto permite observar mejor los resultados gracias a la co-simulación, esta técnica presentada es muy cercana a la realidad por lo que los resultados de la co-simulación son más auténticos y pueden reflejar una visión más real de la dinámica característica del robot delta 3-TPT, en la figura 1 se muestra el robot TPT.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 552-565.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



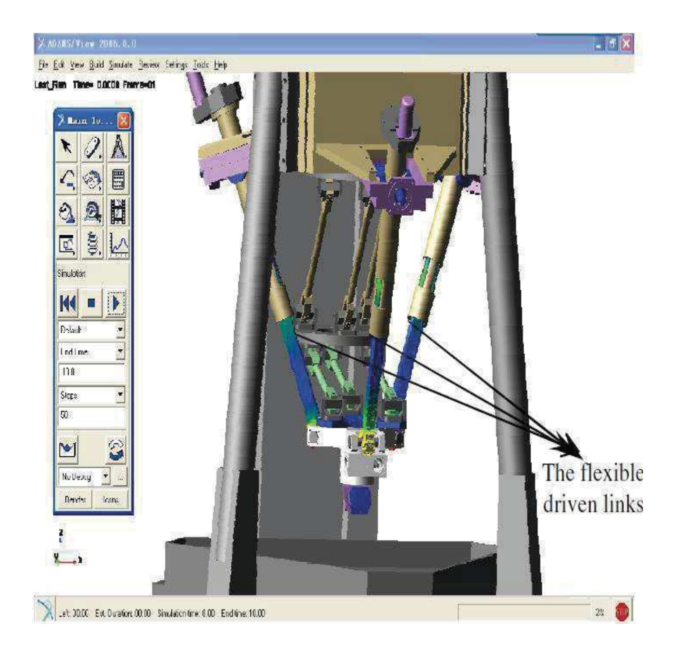


Figura 1. Robot Delta 3-TPT.

En 2010 se lleva acabo el desarrollo de un proyecto de co-simulación de robots cooperativos basado en ADAMS, MATLAB y una interfaz háptica en [2] se aborda el modelado y control basado en CAE de un complejo sistema cooperativo robótico guiado por un operador humano en línea. Se utiliza ADAMS para reproducir el sistema mecánico capaz de manejar y comprender la mayoría de los fenómenos que actúan en él, un controlador complejo, brevemente presentado y programado en MATLAB, que es el encargado de resolver este inconveniente.

En este mismo sentido, ADAMS Y MATLAB® se unen en un sistema de co-simulación. Además, Hardware-in-the-loop es explorado a través de una interface háptica el novint falcon, para proporcionar un acoplamiento kinestésico para el usuario humano, que en la práctica presenta en línea, las trayectorias que se desean generar por el ser humano para todo el sistema. En este sentido, es realmente un sistema de lazo humano en la que junto con el Hardware-in-the-loop utiliza técnicas de co-simulación, tal como se observa en la figura 2.

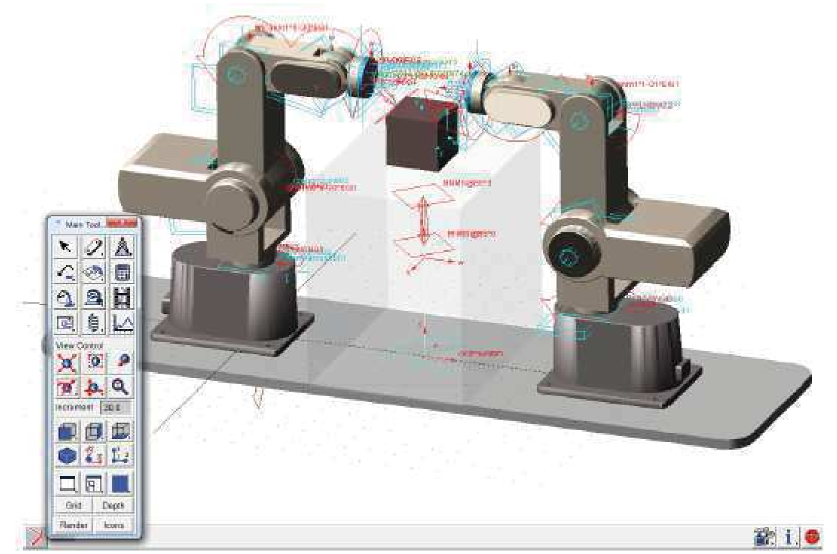


Figura 2. Plataforma Robotica Coperativa en ADAMS

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En 2011 se presenta el modelado dinámico y la simulación de un robot industrial staubli© TX40 véase en la figura 3, utilizando MATLAB / ADAMS en Co-simulación donde se propone precisar un simulador para desarrollar enfoques para la simulación cinemática, dinámica y análisis de control. El modelado del robot se desarrolla tan exacto como uno real por medio de ADAMS, software de modelado dinámico, y vinculado con MATLAB para los estudios de movimiento [3].

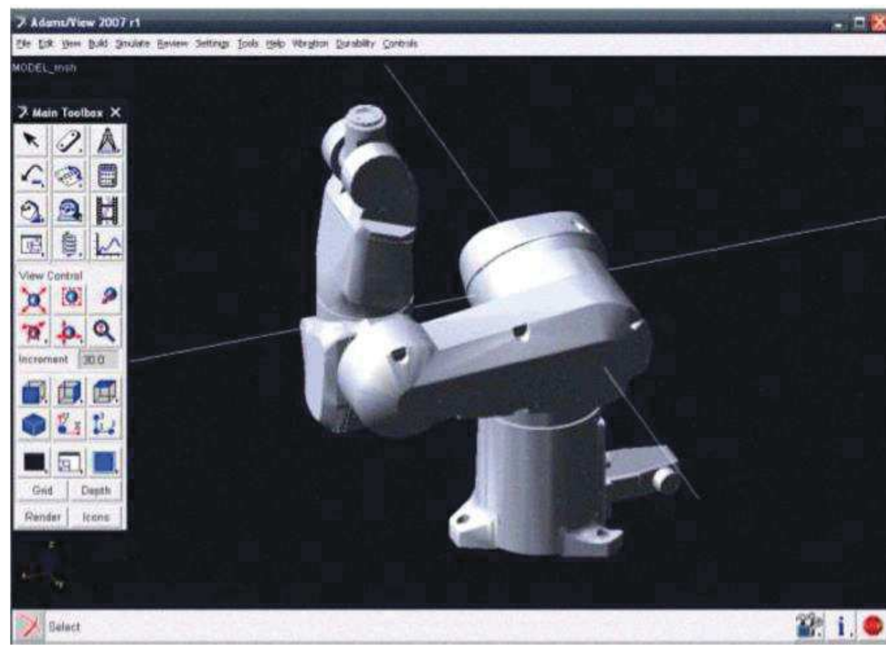


Figura 3. Robot Staubli TX40.

Al igual que los trabajos ya analizados en 2012 se presenta una co-simulación basada en ADAMS/MATLAB donde se estudian las características dinámicas de una clase de robot deslizador acuático como se observa en la figura 4. Permitiendo así una co-simulación que permite apreciar que la plataforma se estabiliza con éxito al ser sometida al movimiento en la superficie del agua [4].

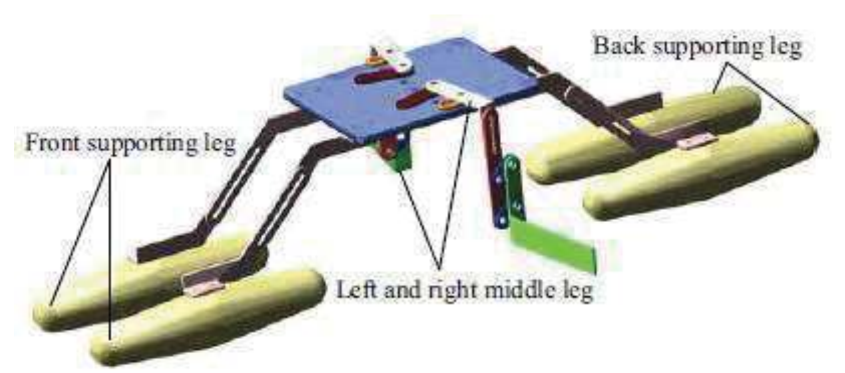


Figura 4. Robot Deslizador Acuático.

También se aborda en el tema diversos estudios de cómo establecer rápidamente el modelo de prototipos virtuales y como resolver con eficacia el control, en 2013 se introdujo un método de control de co-simulación para investigar la dinámica y respectivamente establecer un modelo dinámico que permita comprobar la regularidad de las ecuaciones por medio de métodos como Newton-Euler y Lagrange.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la figura 5, se construye el modelo físico de un brazo en ADAMS®, y también se muestra un modelo de control en MATLAB / SIMULINK®. Además, se establece el modelo de co-simulación basado en ADAMS® y MATLAB® [5].

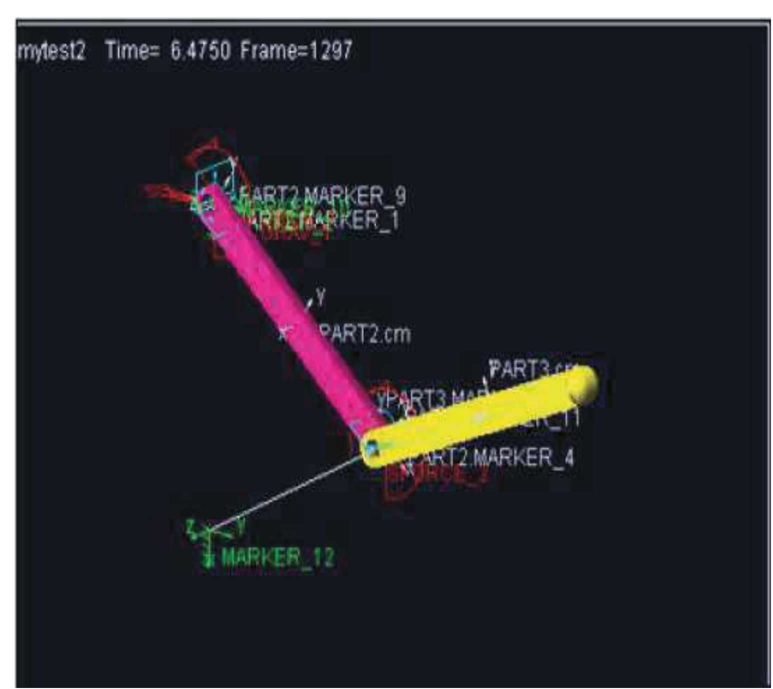


Figura 5. Robot ARM.

En 2014 se han presentado metodologías computacionales eficientes que permitan introducir cualquier código informático externo a el software de simulación, de tal manera que el software de simulación y el de diseño pueden comunicarse durante la simulación del sistema y establecer una co-simulación [6].

Para hacer co-simulación es necesario conocer métodos de análisis, resolución e interpretación del modelo en estudio. Sudharsan, J. & Karunamoorthy, L. [6] proponen un método donde se desarrolla una ecuación cinemática de un robot antropomórfico, como se observa en la Figura 6, posteriormente es modelada en Pro-E una solución de software para diseño mecánico de alto nivel 3D invocado en la herramienta de software ADAMS para su posterior análisis. Un algoritmo de planificación cubico es derivado matemáticamente para accionar el movimiento y simularlo utilizando el entorno de MATLAB.

Con la ayuda de MATLAB y ADAMS el modelo es accionado mediante el algoritmo de planificación de ruta escrito en MATLAB. La trayectoria deseada fue realizada con eficacia, que confirma la eficacia del algoritmo de control de planificación y de camino.

Los resultados permiten analizar el comportamiento dinámico y proporciona una visión clara de los parámetros como el par, aceleración y velocidad.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



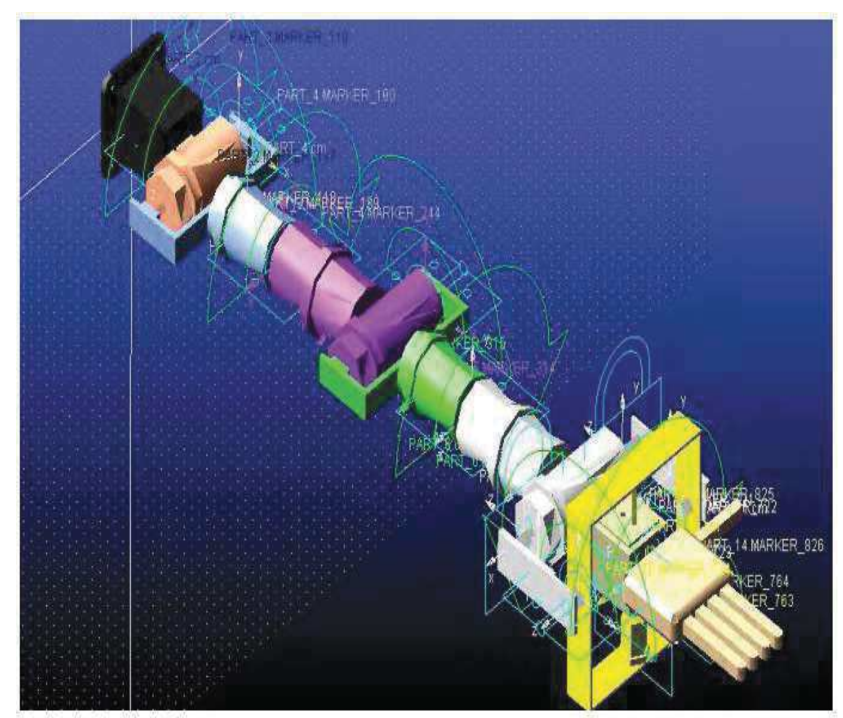


Figura 6. Brazo Robotico Antropomorfico de 8 Grados de Libertad.

La ecuación cinemática de un modelo en análisis puede proporcionar parámetros necesarios para la correcta interpretación del comportamiento, control y dinámica, esto es de gran relevancia ya que son parámetros que deben de ser calculados con gran precisión al interactuar con seres humanos, tal es el ejemplo del trabajo desarrollado en [7]-[8] donde se propone un robot (LapBot) porta herramientas para laparoscopia utilizando un Novint Falcon como interfaz háptica, adaptado a una laparoscopia forceps a través de un sistema de articulaciones pasivas donde describe la cinemática directa e inversa tanto para la interfaz como para las articulaciones que forman el modelo del robot como se observa en la figura 7.

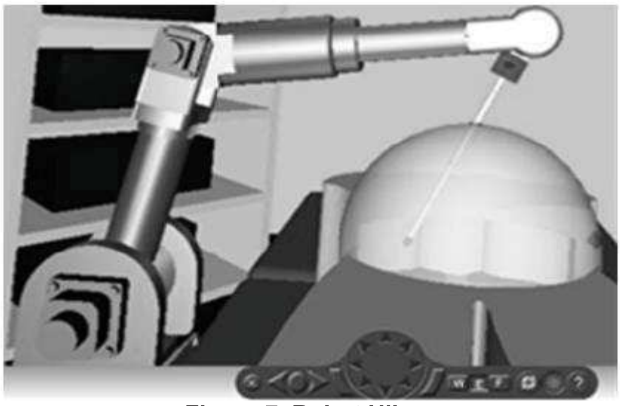


Figura 7. Robot Hibou

En la simulación permite observar que el sistema mantiene un movimiento central en un punto cartesiano de la incisión y se analizó que el espacio de trabajo del robot permitirá realizar ejercicios de formación simulada de abdomen.

Estos avances, métodos de control, análisis y simulación han sido una serie procesos previos realizados por diferentes personajes que lleva a visualizar un mejor panorama de los avances obtenidos hasta el momento, y da la oportunidad de poder plantear técnicas de control y

ISBN: 978-607-9394-14-1.



co-simulación aplicadas en áreas médicas como la rehabilitación con dispositivos hápticos basadas en guiado háptico mediante algoritmos de control no lineal para seguimiento perfecto en [9]-[10] se propone técnicas para rehabilitación de pacientes con discapacidad motriz como consecuencia de lesiones neurólogas. Se presentan estrategias de control no lineal con fines de guiado háptico para rehabilitación médica, donde una de las soluciones es haciendo uso de las propiedades de pasividad que cumple con un sistema electromecánico utilizando la teoría de estabilidad de Lyapunov para el diseño del control en la figura 8 se muestra el dispositivo haptico phantom.



Figura 8 Dispositivo Haptico Phantom.

En resumen, la co-simulación también es conocida como simulación cooperativa, es una metodología de simulación que permite a los componentes individuales para simular en ambientes virtuales y que se ejecutan simultáneamente, por lo que se tiene intercambio de información de manera colaborativa.

Este trabajo presenta el desarrollo de un software que une tres programas programa (co-simulación) para el control de posición de un robot paralelo tipo delta (dispostivo háptico Novint Falcon) de tres grados de libertad (g.d.l.).

Uno de los primeros pasos es realizar el modelo del robot en forma virtual, es decir hacer el diseño mecánico, como son los eslabones y articulaciones en Solidword. Como segundo paso, consiste en convertir en modelo del robot manipulador realizado en Solidword a Adams, donde se le asignan los sensores (encoders) y actuadores (motores) a cada una de las articulaciones, asi como las restricciones del robot. Y como parte final se hace un control de posición para manipular el robot en Matlab/Simulink donde se hace la co-simulación.

2. Software y Hardware

En esta sección, se realiza una breve descripción de los softwares utilizados en la elaboración de este artículo de investigación, con el propósito de relacionarse con la funcionalidad de cada software y su aplicación en la co-simulación. Asimismo, se describe el dispositivo háptico utilizado para la cosimulación.

Esto es con el propósito de señalar la variedad de diferentes herramientas informáticas (ADAMS, MATLAB, SOLIDWORK), con los cuales es posible acceder al diseño y análisis de modelos en estudio.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



2.1 Matlab.

Es un lenguaje de programación de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo técnico, e incluye funciones para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, cálculo numérico, y visualización. Simulink: es un entorno de diagramas de bloques entendible para la simulación de sistemas y el diseño basado en modelos. Permite a los ingenieros simular y analizar una amplia gama de sistemas que incluyen controles, señales y procesamiento de imágenes, comunicaciones, y sistemas físicos multidominio [11].

2.2 Adams.

Es un software de simulación y análisis de mecanismos lineales y no lineales. Cuenta con herramientas para la co-simulación con otros programas informáticos permitiendo el análisis de sistemas de control. La plataforma de trabajo es accesible, amigable y familiar para el usuario. Como también múltiples ventajas como simulador dinámico. También permite la creación de piezas para modelado de sistemas mecánicos, accede a modificar sus parámetros, a introducir la programación necearía para su funcionamiento y análisis. Contiene módulos de trabajo, donde se especifican los tipos de simulación que el usuario desea realizar. También cuenta con aplicaciones tales como: ADAMS (Car, View, Solver, Chassis, Driveline, Flex, Post-proccesor, Insight) MD [12].

2.3 Solidworks.

Es un software de modelado mecánico en 3D, asistido por computadora, cuenta con una gran gama de herramientas de diseño para dibujo, piezas y ensamblajes, Solidworks incluye herramientas de gestión de proyectos, productividad, análisis y simulación que lo convierten en uno de los softwares más competitivos en el mercado [13].

2.4 Dispositivo háptico.

En la actualidad el desarrollo de nuevas tecnologías y avances científicos es exponencial en las distintas áreas del conocimiento, una de esas tecnologías en desarrollo son los dispositivos hapticos que se enfocan en investigar la combinación de la modalidad sensorial del tacto en un entorno de realidad virtual esto se aborda en un tema en particular llamado kinestesia.

Se define el concepto de la kinestesia en la haptica como un campo de investigación que aborda el tema de las sensaciones que se trasmiten de forma continua desde todos los puntos del cuerpo a los centros nerviosos para crear una interacción de dispositivo con músculos y tendones, proporcionando una sensación de que se aplica una fuerza, se percibe calor, frio, dolor, placer, en un mundo virtual, un dispositivo que permite estimular la capacidad sensorial de nuestro cuerpo con impulsos de un entorno virtual es el Novint Falcon figura 9.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



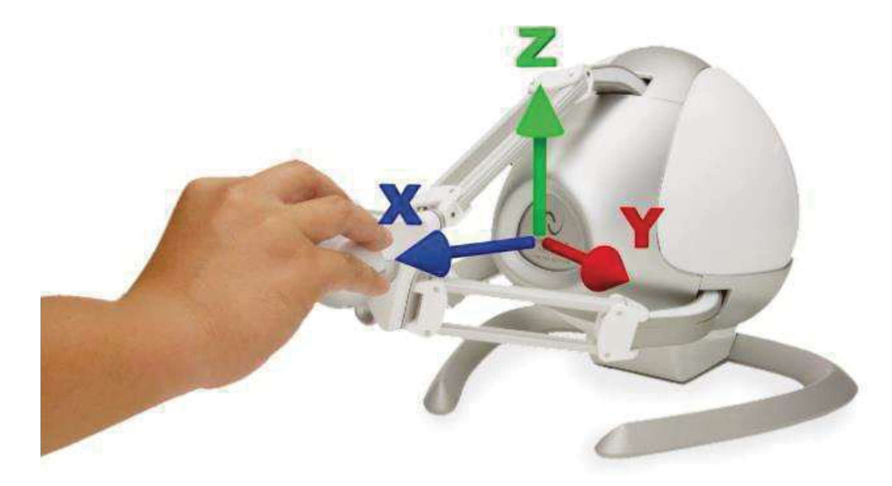


Figura 9. Novint Falcon.

2.5 Características del Novint Falcon.

En la sección anterior, se define la interface háptica como la combinación de la modalidad sensorial del tacto con un entorno de realidad virtual. Esta combinación sensorial se lleva a cabo mediante el conjunto de dispositivos que permitan a un individuo sentir y manipular objetos o sensaciones en entornos virtuales. Con este tipo de tecnología, se proporciona al individuo la capacidad de interactuar con el entorno. En la figura 10 se muestra la interface haptica Novint Falcon que es utilizada en este trabajo.

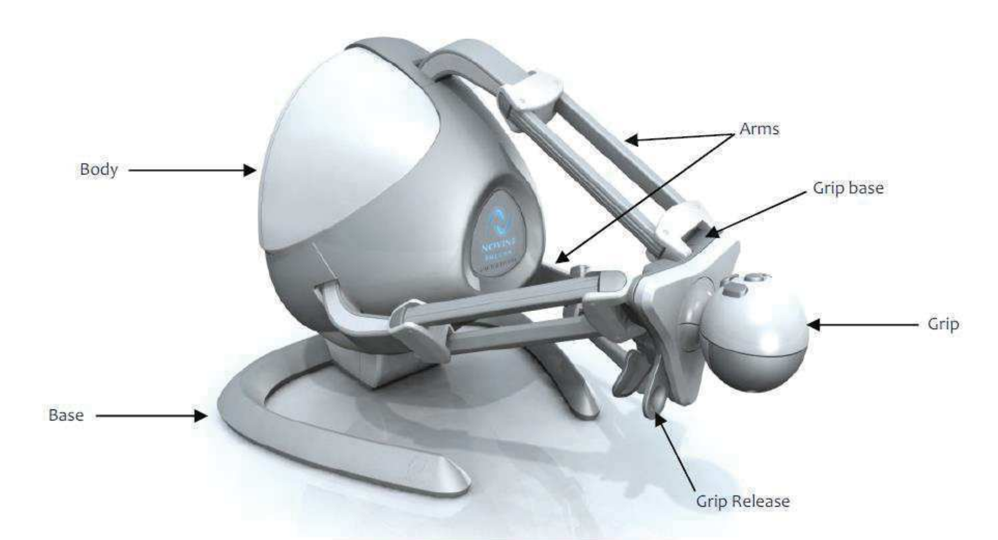


Figura 10. Interface Haptica Novint Falcon

ISBN: 978-607-9394-14-1.



3. Desarrollo y resultados experimentales

3.1 Elaboración del modelo dinámico en Solidworks.

El sistema mecánico ha sido completamente realizado en el software de diseño SolidWorks, con las medidas originales del modelo tomando en cuenta los principios de diseño de máquinas como simetría. El software cuenta con una gran cantidad de herramientas para el diseño y modelado de piezas mecánicas en 3D, en la figura 11 se muestra el modelo.

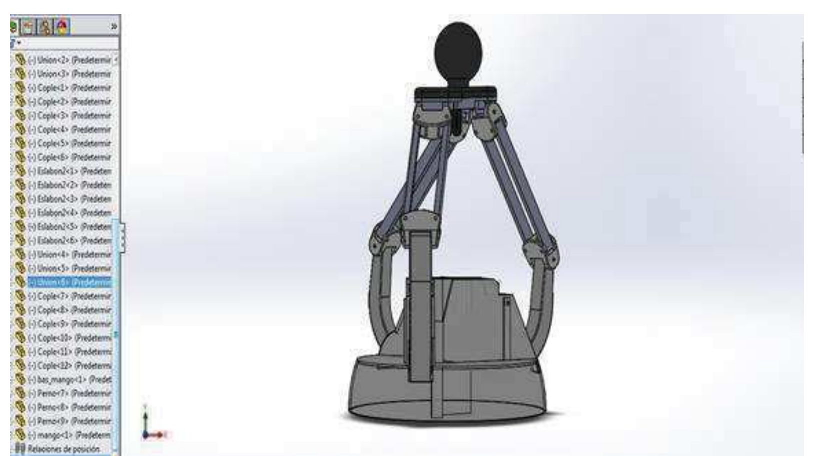


Figura 11. Modelo en solidwork.

La elaboración de cada una la pieza permite generar un modelo cercano a la realidad en la figura 12 se muestra la vista de conjunto del modelo en solidworks, que resulta un total de 39 piezas entre las cuales incluye pernos, eslabone de unión, eslabones principales de transmisión de movimiento como se puede observar.

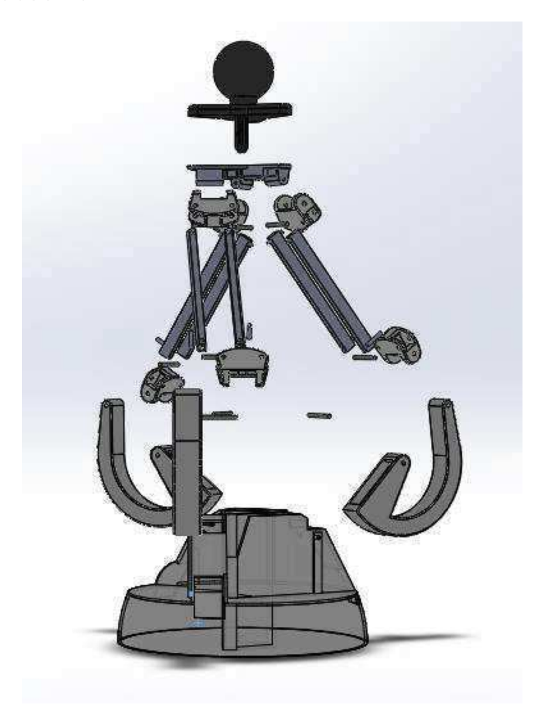


Figura 12. Vista explosionada del modelo en solidworks

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 552-565.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.2 Importación del modelo dinámico en Solidworks a Adams

Para proceder con la importación del modelo en Adams es necesario tener en cuenta la compatibilidad de los softwares Adams, Matlab y SolidWorks para no tener ningún problema de compatibilidad al importar de SolidWorks a Adams y sobre todo en la co-simulación de Adams/Matlab.

Para realizar la importación del modelo se abre file>Import como se muestra en la Figura 13, se despliega una ventana donde se selecciona la extensión del modelo diseñado en solidworks (*.sldprt;*sldasm) como muestra la figura 14. A continuación en la sección >file to read se busca el archivo haciendo click derecho>browse y se selecciona el archivo, en > part name se cambia por >model name y sobre el espacio en blanco se hace click derecho y se seleccion >model>create y designa el nombre de nuestro modelo, por último aplicar y ok.

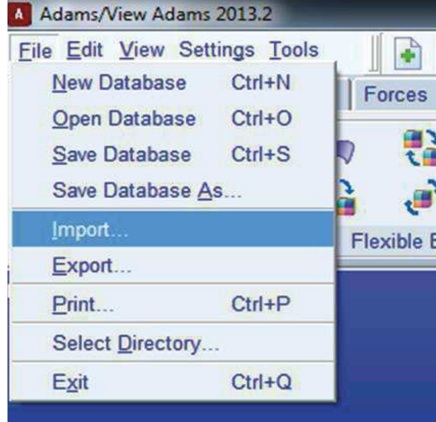



Figura 13. Importar.

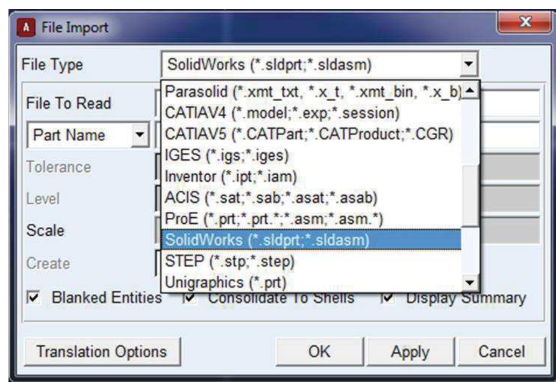


Figura 14. Extensión del modelo.

Adams procede a cargar el modelo piezas y relaciones de posición, es recomendable eliminar relaciones de posición en el modelo y solo dejar lo esencial para el modelo, esto con el fin de evitar errores en la simulación del modelo debido a que el exceso de estas genera redundancias, en la figura 15 se muestra el modelo importado en Adams.

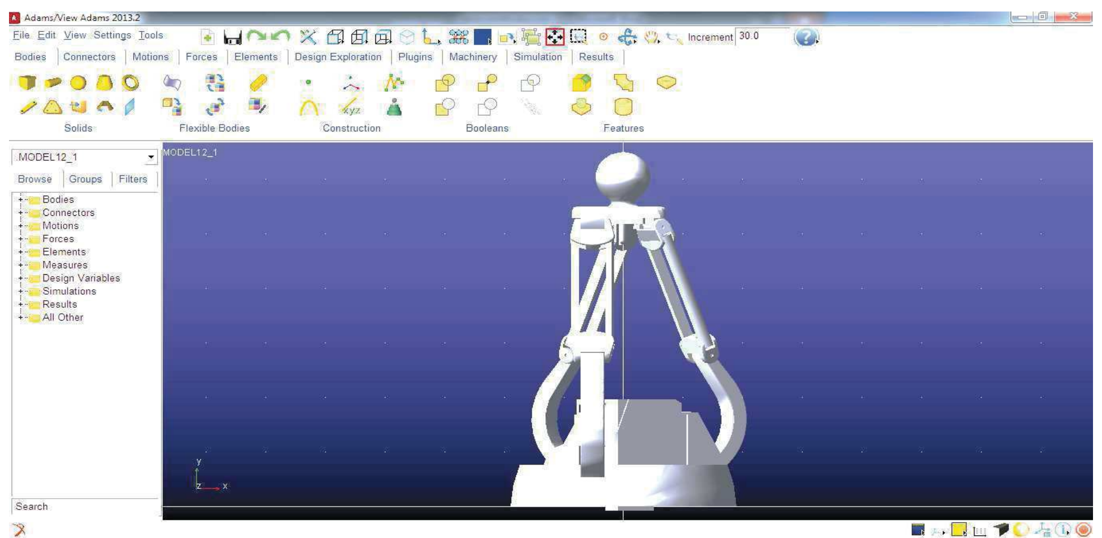


Figura 15. Modelo importado en ADAMS.



3.3 Importación del modelo dinámico de Adams a Matlab

Para realizar la importación, en adams dar click en controls>plant export. En “input signals” se coloca las variables de entrada dando clic derecho en el cuadro blanco y en “output signals” las variables de salida como se puede apreciar en la figura 16.

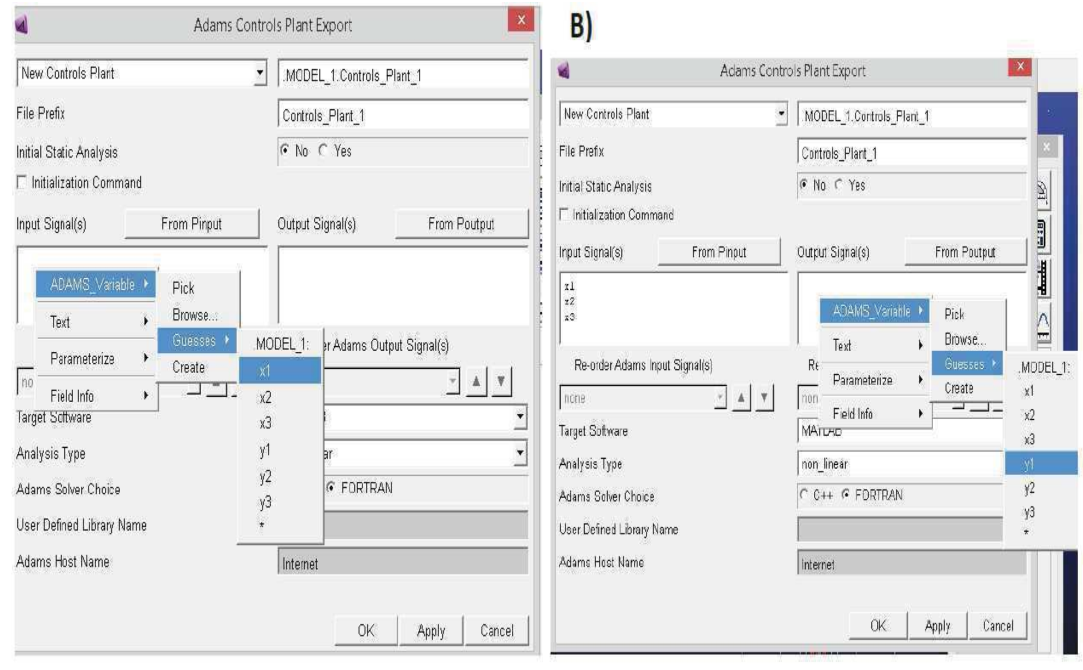


Figura 16. Alta de las variables de salida y entradas.

En “target software” se selecciona MATLAB y después OK para exportar la plantilla de control en Matlab figura 17.

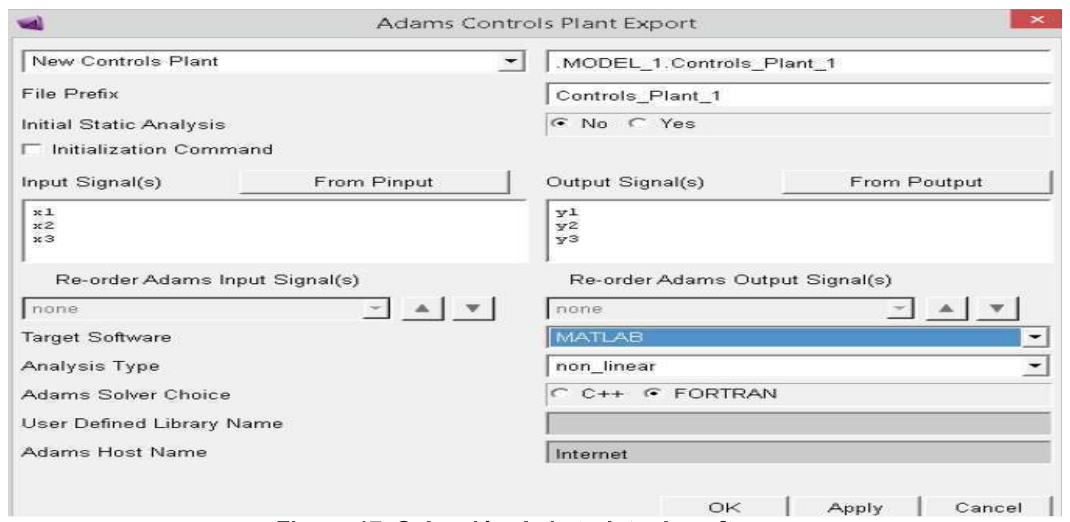


Figura 17. Selección de la tarjeta de software.

Para abrir el programa en Matlab se guarda el modelo de Adams como MODEL_3 y se cierra. Ahora se debe abrir Matlab y elegir el folder donde se guardó el modelo de Adams.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Una vez realizado la selección del folder se redacta los comandos requeridos como se aprecia en la figura 18.

Controls_Plant_3: Es el nombre de la plantilla de control que se exporta de Adams.

adams_sys: Este comando permite ejecutar el diagrama de bloques del modelo en simulink.

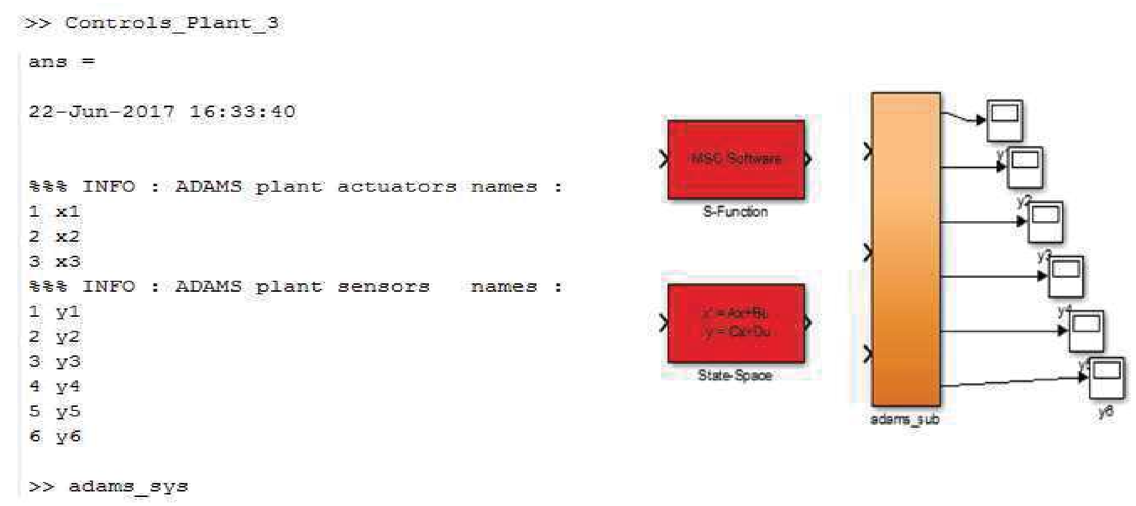


Figura 18. Comandos y diagrama de bloques en matlab

A continuación, se hace doble clic en adams_sub y en MSC software, dentro del bloque se observa que en "Animation mode" esta predeterminado "batch" se cambia por "interactive" como se observa en la figura 19. Esto con la finalidad que al realizar la simulación en simulink se despliegue una ventana de Adams que permita observar la animación del modelo.

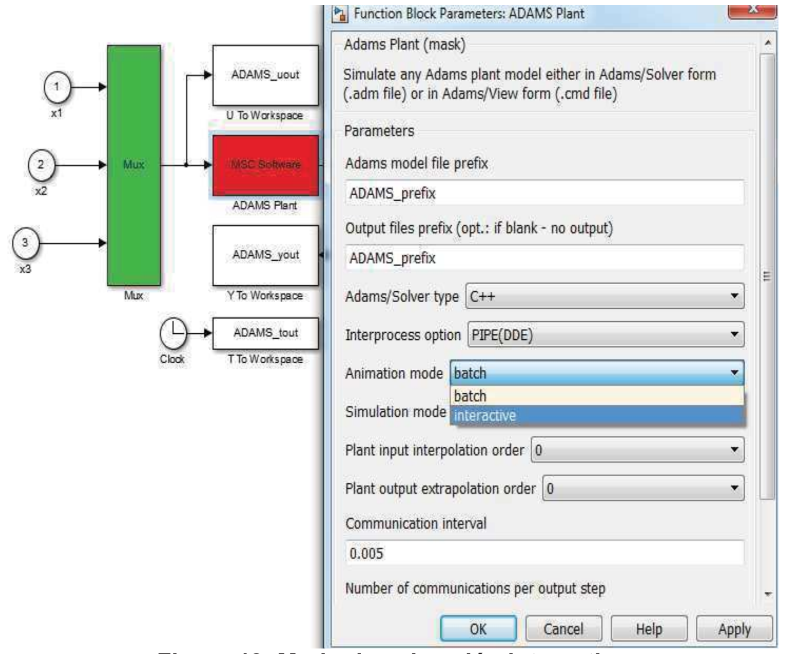


Figura 19. Modo de animación interactivo

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 552-565.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



3.4 Equipo experimental y resultados

En la figura 20, se muestra el equipo experimental que se utiliza para la co-simulación, como se observa esta compuesta por una laptop con procesador i5 y el dispositivo háptico Novint Falcon.



Figura 20. Equipo experimental

El diagrama de bloques en Matlab y la ventana de simulación de Adams trabajando en conjunto para establecer un co-simulación y permitir el análisis del modelo como se observa en la figura 21.

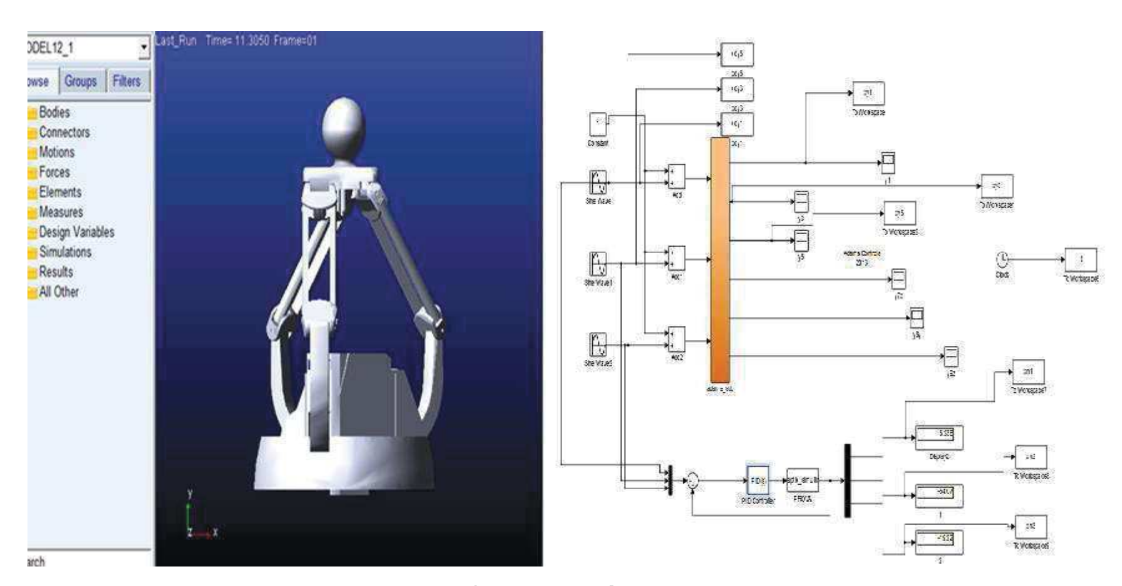


Figura 21. Co-simulación Adams/Matlab

En la figura 22 se puede apreciar dos señales, una derivada de la co-simulación del Novint Falcon (señal en color rojo) y la otra del Novit Falcon real (señal en color azul), como se puede apreciar son parecidas, ambas están en lazo abierto. Porque lo que se concluye, que el modelo en co-simulación es muy parecida al modelo real.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra el diseño de un robot paralelo virtual a través de la co-simulación entre tres software SolidWork, Adams y Matlab, en el primer software se diseña el modelo completo del robot a medidas reales otorgadas por el dispositivo háptico Novint Falcon, y en el segundo se utiliza para importar el modelo del robot, en Adams se hace toda la parte virtual del robot, es decir se asignan los sensores y actuadores; y en Matlab se hace toda la parte de la co-simulación y control.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Para validar que el modelo del robot paralelo en co-simulación funciona correctamente se emplea un control con resultados satisfactorios. *Este trabajo ayuda al diseño de robots y al control, ya que muchas veces se necesita validar los algoritmos de control en co-simulación antes de llevarlos a la validación experimental y con ello no dañar el equipo experimental.* Por lo que se concluye que la co-simulación fue un éxito.

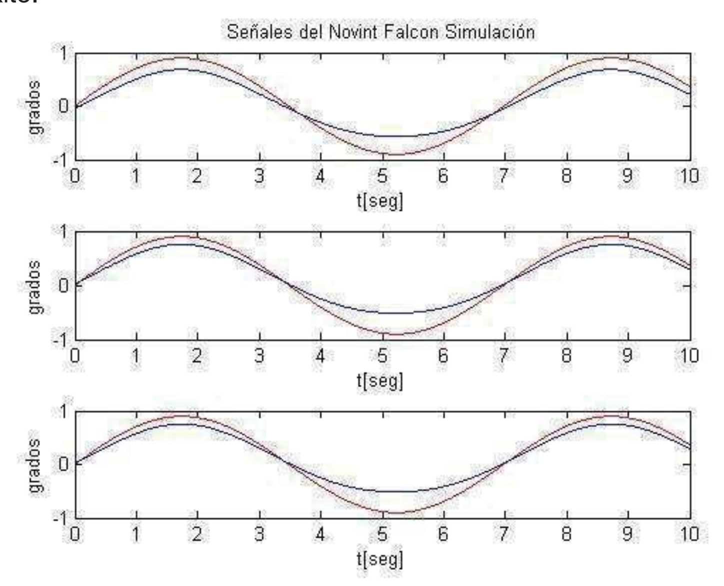


Figura 22. Señales del Novint Falcon en Simulación

Referencias

[1] Romaiguere, Anton JL, Roth M, Casini L, Roll JP. "Kinaesthesia activates both motor and parietal cortical areas in humans" : a parametric fMRI study. Cognit. Brain Res. 16, 74-82, (2013).
[2] Alfredo Cortés Juárez, Miguel A. Durán Fonseca, Fidel Chávez Montejano y Jorge Gudiño Lau, "Contol Lineal Aplicado a Dispositivo Haptico" México (2014).
[3] Luo Haitao, Liu Yuwang, Chen Zhengcang and Leng Yuquan, "Co-Simulation Control of Robot Arm Dynamics in ADAMS and MATLAB". (2013).
[4] Andrew S. Elliott, "A Highly Efficient, General-Purpose Approach for Co-Simulation with ADAMS ®" , (2014).
[5] M. Bonilla-Jiménez, V. Parra-Vega, F. J. Ruiz-Sánchez, "H 2 IL Co-simulation of Cooperative Robots based on ADAMS, MATLAB and a haptic interface"
[6] Sudharsan, J. & Karunamoorthy, L. "Path Planning and co-simulation control of 8 dof anthropomorphic robotic arm". (2016).
[7] O.L. Tapias, S.A. Salinas. "A Toolholder Robot for Laparoscopy Based in the Novint Falcon Interface: Workspace". (2016)
[8] Oscar Andrés Vivas, Carlos Felipe Rengifo, Víctor Hugo Mosquera. "Simulador quirúrgico para operaciones de laparoscopia utilizando interfaces hápticas"(2016)
[9] Omar A. Dominguez-Ramirez, V. López-Morales, R. Samperio-Llano "Interacción Háptica en Laberintos Virtuales, con Propósitos de Diagnostico en Pacientes con Discapacidades Neuropsicológicas". (2016)
[10] Ing. Alejandro Jarillo Silva, Ing. Iván Hernández Ángeles y Dr. Omar A. Domínguez Ramírez. "una interfaz para retroalimentación kinestética, entrenamiento y teleoperación con propósitos de diagnóstico y rehabilitación médica". (2016)
[11] A. Gilat, MATLAB. Hoboken, NJ: Wiley. (2015).
[12] M. Pérez Sandoval, "Co-simulación Adams/Matlab para el control de posición del robot gryphon", Tesis Licenciatura. Universidad Pontificia Bolivariana. (2012).
[13] S. González. Solidworks practico II. Marcombo. (2012).

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 566-578.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Redes de Sensores Inalámbricas Conectados al Internet de las Cosas (IoT) Mediante Protocolo MQTT

Guerrero Sánchez Alma Eliza [1], Díaz Reséndiz José Luis[1], Escobar Díaz Guerrero Rodrigo [2] y Rivas Araiza Edgar Alejandro [2]

Instituto tecnológico de Querétaro [1].
Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería [2].

Resumen

El presente trabajo describe una arquitectura de hardware y software de una red de sensores inalámbrica para operar en el marco del Internet de las Cosas. Como parte fundamental del trabajo se analiza y describe el funcionamiento y operación del protocolo de comunicación MQTT como una alternativa eficiente y escalable para conectividad de los dispositivos acorde al concepto de Internet de las Cosas (IoT). La red de sensores implementada en este trabajo incluye monitoreo de variables como temperatura, humedad, gas y luz; para lo cual se utilizaron distintas plataformas de hardware entre las que se incluyen la tarjeta Raspberry Pi y Launchpad CC3200 de Texas Instruments. Los datos recopilados se almacenan en una base de datos para su posterior visualización, mediante gráficas, de forma remota desde un navegador web.

Palabras clave: MQTT, WSN, IoT, sistema publish/subscribe.

1. Introducción

En los últimos años las redes de sensores inalámbricas (en inglés, *Wireless sensor networks*, abreviadas WSN) junto con el internet de las cosas (en inglés, *Internet of Things*, abreviado *IoT*) han tomado gran relevancia en el mundo moderno debido a que ofrecen soluciones a diferentes áreas académicas y de la industria. Además se ha extendido su uso en diversos aplicaciones como el monitoreo del entorno, el transporte inteligente, la domótica, la predicción de desastres naturales, las aplicaciones en la agricultura, las aplicaciones industriales, las aplicaciones médicas, entre muchas otras [1][2][3]. La mayoría de estas aplicaciones requieren transferir datos de los sensores a una infraestructura de red tradicional (internet, LAN, red empresarial, etc.) por medio de dispositivos con distintas arquitecturas, poca capacidad tanto en almacenamiento como en procesamiento y una limitada banda ancha, aunado a ello las WSN suelen tener direcciones dinámicas por lo que una dirección de red puede cambiar en cualquier momento; por lo que un protocolo de comunicación que satisfaga todas estas necesidades era necesario. Se han desarrollado distintos protocolos de comunicación orientados a las WSN y a IoT en los que destacan: MQTT, CoAP y LWM2M; entre ellos el más utilizado es MQTT.

El presente trabajo se centra en el desarrollo e implementación de un sistema que utiliza el protocolo MQTT en una red local para el monitoreo de distintas variables (temperatura, humedad, luminosidad y presencia) en un edificio de oficinas. Como principal aportación se considera el análisis del protocolo MQTT y su implementación en diversas plataformas de hardware, se considera que dicho protocolo es una herramienta más efectiva, comparada con otras alternativas comúnmente usadas entre la comunidad académica en cuanto a conectividad de dispositivos se refiere, ya que es más común encontrar referencias a trabajos de sistemas que se integran mediante protocolo HTTP. Sin embargo como se discutirá más adelante, el protocolo HTTP presenta inconvenientes, por la misma razón el protocolo MQTT ha ganado popularidad e importancia incluso a nivel industrial.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 566-578.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



2. Redes de sensores inalámbricas (WSN)

Una red de sensores inalámbricos o WSN se entiende como una serie de nodos interconectados por radiofrecuencia que trabajan de manera conjunta, cuya finalidad es obtener información relevante del medio (a través de sensores) y con ella pueden interactuar con el ambiente (a través de algún actuador).

Las WSNs surgen en 1980 pero no fue hasta el 2001 que comenzaron a tomar relevancia en el área industrial y de investigación, debido a la disponibilidad de componentes pequeños, poco costosos y de bajo consumo; como procesadores, radios y sensores [3][4]. Por esta razón en el año de 2003 el MIT catalogó a las redes de sensores inalámbricas como una de las 10 tecnologías emergentes que cambiarían el mundo [5].

En la Figura 1 puede observarse una representación de una WSN, conformada por cuatro partes fundamentales:

• **Un sistema de sensado:** que puede estar conformado por uno o varios sensores los cuales permiten medir una variable física y transformarla en voltajes o corrientes.

• **Un sistema de procesamiento:** comúnmente integrado por un microprocesador o un microcontrolador, el cual se encarga de interpretar la información sensada, dirigirla hacía algún nodo o Gateway, además si el sistema cuenta con algún actuador se encarga de activarlo.

• **Un sistema de radiofrecuencia (RF):** conformado por diversos tipos de antenas. Tiene como finalidad convertir los impulsos eléctricos en ondas de radio y viceversa.

• **Un sistema de alimentación:** encargado de energizar todos los elementos de la red.

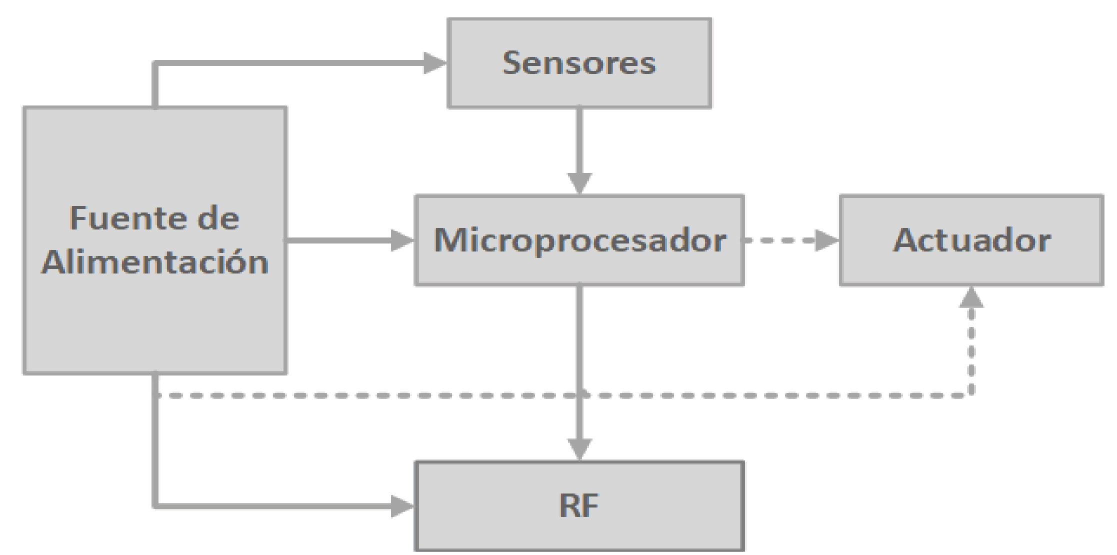


Figura 1. Representación básica de una WSN.

3. Internet de las cosas (IoT)

En el contexto de nuevas tecnologías la conexión entre objetos físicos (llamados "cosas") e Internet ha hecho posible la intercomunicación a distancia entre el ser humano y los objetos, inclusive la comunicación entre máquina y máquina (M2M), dotando a dichos objetos de reactividad, pro

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 45, pp. 566-578.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



actividad, intercomunicación y autonomía, convirtiéndolos así en dispositivos inteligentes "Smart Devices".

El Internet de las Cosas está basado en el paradigma de transformar cada cosa u objeto en un dispositivo inteligente con el fin de mejorar su funcionalidad, esto se logra al fusionar pequeños dispositivos electrónicos de funciones específicas con algún objeto físico, dotando así al objeto con la capacidad de interactuar con el medio, a este clase de objetos se le conoce como sistemas embebidos; si a la vez dotamos a este sistema embebido de conexión a internet, convertimos nuestro objeto de interés en un dispositivo inteligente [6].

A medida que el Internet de las Cosas permea nuestra sociedad el número de dispositivos inteligentes aumenta y con ello nos acercamos a nuevas oportunidades de mejorar la calidad de vida de las personas o consumidores, al mismo tiempo que se potencia la productividad de las empresas [7]. De acuerdo a Cisco [8], 50 billones de dispositivos estarán conectados a internet para el 2020, lo cual nos deja ver que el IoT puede ser de alto impacto en nuestras sociedades en un corto plazo.

La sinergia entre las redes de sensores inalámbricas y el Internet de las Cosas ha potencializado a estos dos tipos de tecnologías simultáneamente, el IoT se ha beneficiado de las WSNs debido a que estás redes cada vez son más económicas, de menor consumo e inalámbricas pueden ser implementadas en cualquier entorno, en cualquier objeto, vislumbrándose como el factor clave en la implementación del Internet de las Cosas ; de la misma forma con la meta de vincular cualquier objeto con el medio y con internet el campo de acción de las redes de sensores se ha diversificado.

4. **Sistemas publish/subscribe**

Para poder comunicar diferentes dispositivos en el IoT por medio de redes inalámbricas es necesario un sistema robusto especialmente diseñado para las necesidades descritas anteriormente, para ello existen los sistemas *publish/subscribe*. Los sistemas publish/subscribe (abreviado pub/sub) son modelos de comunicación compuestos de 3 elementos fundamentales: un *subscriber*, un *publisher* y un *broker*. El *subscriber* es el o los elementos de la red que solicitan cierta información de su interés. El *publisher* es el o los elemento que producen y publican información que posteriormente, si es requerida, será solicitada por un *subscriber.* El *broker* es la entidad que se encarga de conducir la información de forma correcta desde los *publishers* hasta los *subscribers*.

Existen 3 tipos distintos de sistemas pub/sub: basados en tópicos, basados en tipo y basados en contenido. Los basados en tópicos tienen una lista de tópicos usualmente conocida por los subscribers y publishers (cada uno tiene un conjunto definido de temas), MQTT es un sistema basado en tópicos, un esquema con los componentes principales puede observarse en la Figura 2. En los basados en tipo el estado del subscriber es el tipo de información que se le permite sustraer (por ejemplo: humedad <dato>). En los basados en contenido el subscriber describe el contenido del mensaje que desea recibir que puede provenir de uno o varios sensores, por ejemplo: la temperatura y la humedad de las habitaciones donde la temperatura sea mayor a 30 °C.

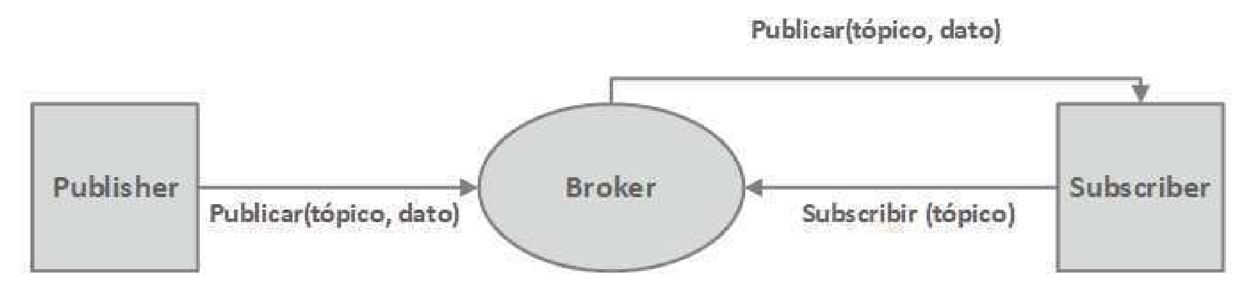


Figura 2. Esquema básico de un sistema pub/sub basado en tópico.



4.1 *MQTT*

Para todo dispositivo usado en Internet de las Cosas (IoT) es necesaria una conexión a Internet y HTTP no es una opción escalable para múltiples dispositivos de bajo costo, bajo consumo de energía y/o en una red con alta latencia; por lo que diversos protocolos de comunicación han sido desarrollados, entre ellos el más usado es MQTT debido a sus diversas cualidades. MQTT (Message Queue Telemetry Transport) es un protocolo que se ha convertido en un estándar para el internet de las cosas. Se basa en un protocolo de mensajería publish/subscribe, a diferencia de HTTP que es petición/respuesta [9].

MQTT fue creado a finales de los 90 por IBM y su aplicación original era conectar sensores con satélites. Transfiere información de forma asíncrona y sin el uso de una dirección fija. El formato de cada mensaje puede observarse en la Figura 3, consta de 3 partes principales:

- Encabezado fijo. Ocupa sólo 2 bytes y es obligatorio en todos los mensajes.
- Encabezado variable. Ocupa 4 bits y no es obligatorio en todos los mensajes.
- Mensaje o carga útil (del inglés payload). Puede tener un máximo de 256 Mb teóricamente, aunque en implementaciones reales el máximo es de 2 a 4 kB.

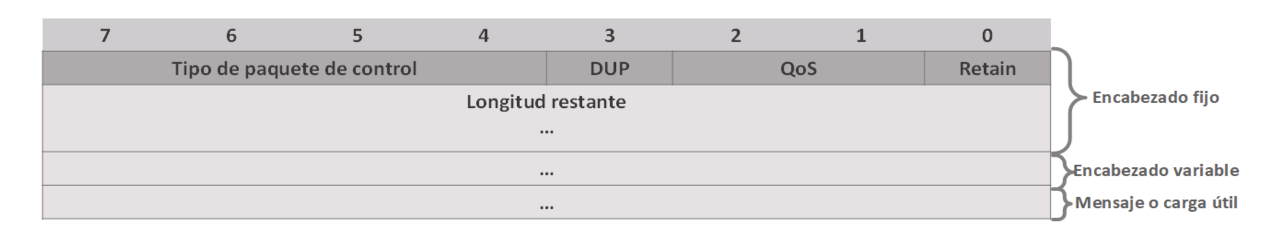
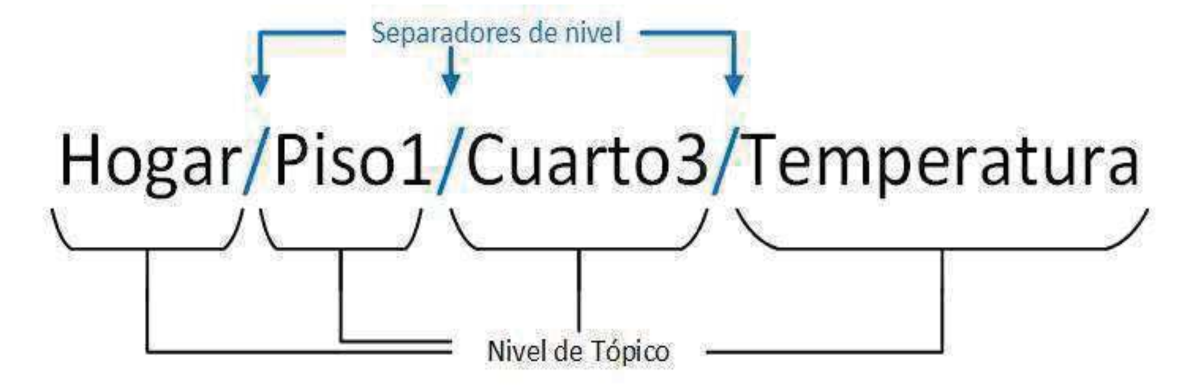


Figura 3. Formato del Control de paquetes en el protocolo MQTT

Como se ha mencionado anteriormente MQTT utiliza un sistema de publicación y subscripción donde existen dos tipos de entidades un intermediario de mensajes (broker) y uno o varios clientes (cualquier dispositivo que pueda suscribir o publicar). El broker recibe todos los mensajes y los reenvía a los clientes pertinentes. La manera en que un cliente se conecta con el broker es por medio de tópicos.

Los tópicos son cadenas de caracteres UTF-8. Un tópico tiene uno o más niveles y cada nivel está separado por una diagonal, un ejemplo donde se enmarca cada componente puede verse en la Figura 4. En comparación con una cola de mensajes, un tópico es mucho más ligero, pues no se necesita una inicialización previa. Cabe aclarar que cada tópico debe contener al menos un carácter y el protocolo es sensible a las mayúsculas.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 4. Ejemplo de nivel de tópico.

Cuando un cliente se suscribe a un tópico, puede usar el nombre del tópico exacto en el que se publicó el mensaje o puede suscribirse a más temas a la vez mediante el uso de comodines o Wildcards. Un Wildcard solo se puede utilizar al suscribirse a tópicos y no está permitido cuando se publica un mensaje. existen dos tipos de comodines: comodines de un solo nivel y de múltiples niveles.

El comodín de un solo nivel es "+", y como lo indica su nombre nos permite incluir tópicos dentro del mismo nivel por ejemplo: Hogar/Piso1/+/Temperatura permite la subscripción a todos los sensores de temperatura de los cuartos del primer piso pero no a otros sensores o a otros pisos.

El comodín multinivel es "#" y nos permite suscribirnos a múltiples tópicos de diferentes niveles (cabe aclarar que este comodín solo se puede utilizar al final de la cadena). Por ejemplo: Hogar/Piso1/# permite la subscripción a todos los subniveles de Piso1 eso incluye a todos los cuartos y a todos los tipos de sensores [10].

MQTT define 3 niveles de calidad de servicio. El nivel 0 establece que el mensaje se envía por lo menos una vez, el remitente no emite ninguna respuesta y el emisor no trata de verificar si el mensaje fue enviado. El nivel 1 garantiza que el mensaje se recibido al menos una vez (se retransmite hasta que sea recibido). El nivel 2 no solo asegura la recepción del mensaje sino que también se asegura que solo haya sido recibido una vez. Por default se establece el nivel 0 [11].

MQTT también cuenta con 3 opciones de seguridad, dado que los datos que viajan pueden a llegar a ser críticos.

- Transporte en SSL/TLS
- Autenticación mediante certificados SSL/TLS
- Autenticación mediante usuario y contraseña

Estas tres opciones se modifican desde el bróker, en el archivo de configuración de donde arranca el servicio MQTT, de igual forma en este archivo se pueden configurar usuarios y contraseñas para que solo estos usuarios tengan acceso a ciertos sensores o aparatos que se conecten, su acceso se autoriza en el código del que manda los datos.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



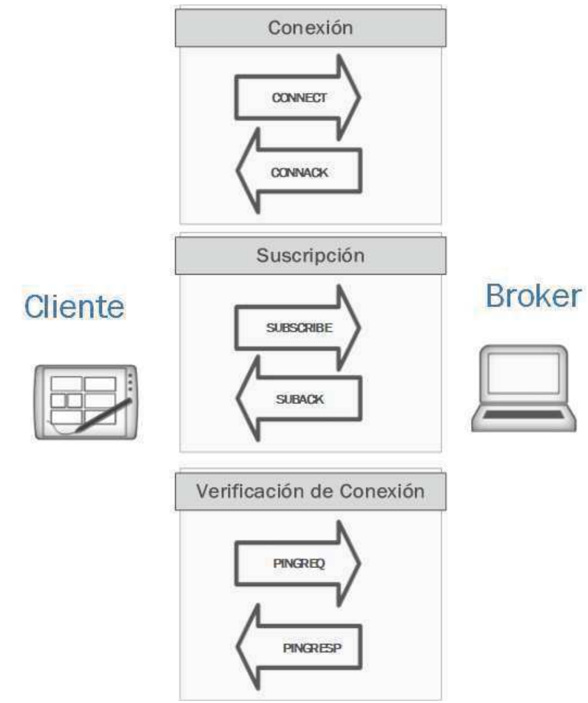


Figura 5. Proceso de conexión del protocolo MQTT.

En la conexión en el protocolo MQTT ningún cliente se conecta directamente, siempre se conectan con el *Broker,* la conexión la inicia el cliente enviando un mensaje *CONNECT (solicitud de conexión)* al *broker*, a lo cual el *broker* responde con un mensaje de reconocimiento llamado CONNACK (contiene solo dos entradas de datos: una bandera de presencia de sesión y un código de retorno de conexión). Después de que se establece la conexión el cliente se conecta a un tópico en particular enviando un mensaje *SUBSCRIBE,* posteriormente el *broker* regresa un mensaje *SUBACK* confirmando su petición de suscripción. Para determinar que la conexión continua activa EL CLIENTE emite un mensaje *PINGREQ,* si continúa activa el *broker* responder con un *PINGRESP* (es responsabilidad del cliente verificar que la conexión sigue activa). Una vez que se establece la conexión, el intermediario la mantendrá abierta siempre y cuando el cliente no envíe un comando de desconexión o pierda la conexión. La Figura 5 muestra un diagrama donde puede observarse el proceso de conexión.

5. **Implementación del protocolo MQTT y componentes utilizados.**

Las etapas propuesta para implementar el protocolo MQTT en una red de sensores se muestran en la Figura 6, en primera instancia es necesario instalar y configurar el intermediario de mensajes (*Broker*), existen diferentes *Brokers* en la nube, como lo son IBM Bluemix, hivemq, cloudMQTT, ThingMQ ThingStudio entre otros, las herramientas anteriores son de paga y con versiones de prueba altamente limitadas; por otra parte existen herramientas gratuitas de código abierto que nos permiten ejecutar un broker desde una computadora, entre ellas la más conocida es *Mosquitto* que forma parte del proyecto Eclipse Paho (proyecto que provee herramientas de código abierto para la implementación de MQTT), mismo que constituye la selección para este trabajo.

La segunda etapa de la metodología fue la instalación de dependencias necesarias así como la librería *libmosquitto-dev* en una PC con sistema operativo Ubuntu Desktop 16.04 de 2 GB de RAM.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



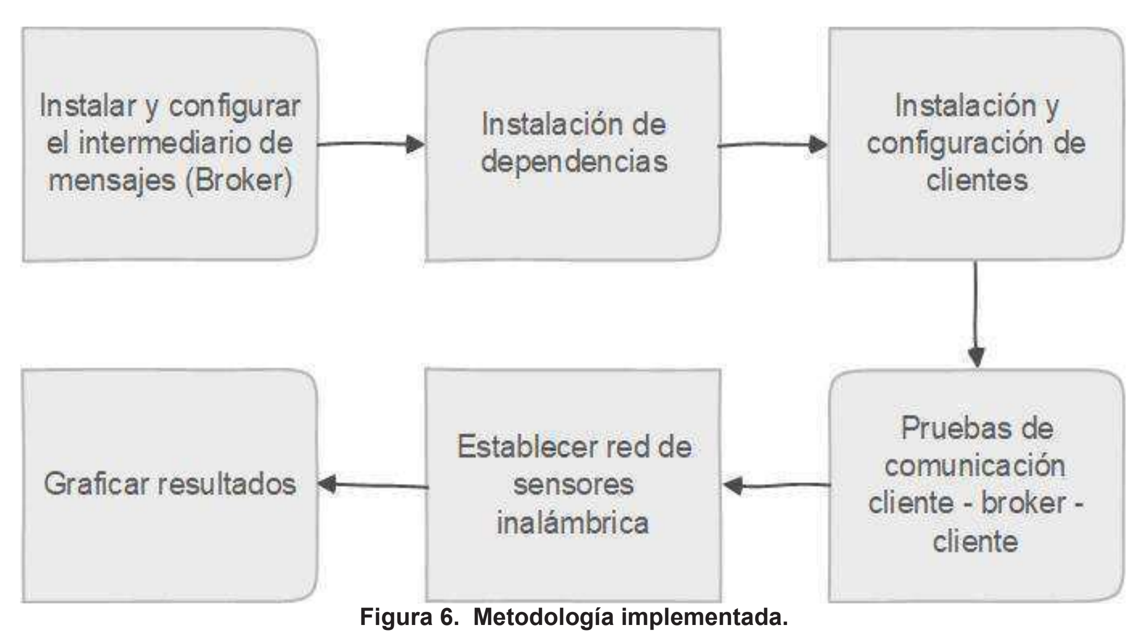
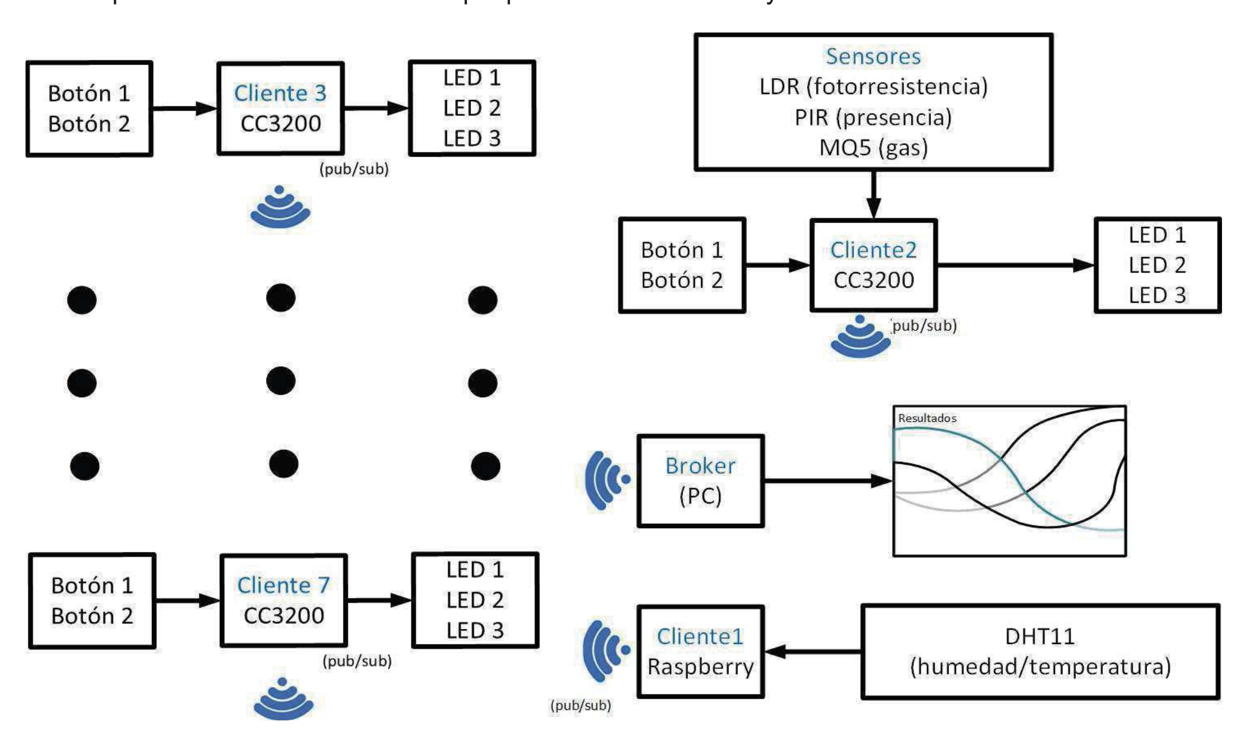


Figura 6. Metodología implementada.

Los clientes utilizados comprenden: una Raspberry Pi 2 Modelo B con sistema operativo Raspbian y seis tarjetas de desarrollo CC3200 Module LaunchPad de Texas instruments. El cliente de la Raspberry fue implementado en python usando la librería *paho-mqtt*, y para los CC3200 se usó el entorno de desarrollo code composer studio para compilar código en lenguaje C, esto se logró mediante la implementación de ciertas librerías cuyas funciones específicas son llamadas dentro de la función principal, entre ellas están: "common.h" (Donde se accede al access-point AP mediante el SSID NAME, SECURITY TYPE y SECURITY KEY), “simplelink.h”(Librería encargada de la interacción de la placa con la red Wi-Fi), “pinmux.h”(Librería donde se declaran el uso que se le darán a los pines de las placas),"sl_mqtt_client.h"(Librería donde se definen las funciones que implementan el protocolo MQTT, desde elegir el servidor, crear un cliente, inicializar la comunicación, finalizar la comunicación,subscribirse y publicar a un tópico).

En el diagrama de la Figura 7 puede observarse la manera en que están conectados todos los dispositivos de la red. Cabe aclarar que los clientes están conectados por WiFi al broker. En la tarjeta Raspberry Pi se conectó un sensor de temperatura y humedad DHT11; a una de las CC3200 se conectaron una fotoresistencia (LDR), un sensor infrarrojo pasivo (PIR) para detección de presencia y un sensor de gas MQ5. Mientras que el resto de las tarjetas CC3200 incluye interruptores y LEDs como periféricos de entrada/salida que pueden monitorearse y controlarse de forma remota.



ISBN: 978-607-9394-14-1.



Figura 7. Diagrama del sistema.

El convertidor analógico-digital (ADC) de la tarjeta CC3200 es de 12 bits es decir tiene 4096 niveles y cuenta con un voltaje de referencia de 1.4 Volts, dándonos una resolución de conversión de 1.4/4096 = 0.3417 mV. Para implementar la conversión de A/D del CC3200 se seleccionaron los pines que nos permitían esta capacidad, tomando en cuenta el manual del dispositivo la selección de pines quedó de esta manera: pin 58 entrada del LDR para conversión de luz, pin 59 para digitalización de señal del sensor de gas. Para introducir los voltajes analógicos de los sensores al CC3200 se tuvo que adecuar la señal debido a que los pines del dispositivo tienen un voltaje de entrada de 1.4 Volts (máximo 1.8 V).Para realizar eso se utilizaron como referencia los documentos de Texas instruments *CC3200 ADC* y *CC3200 ADC Appnote*, en ellos se hace referencia al voltaje de entrada y en agregar un capacitor a la entrada de los pines del MCU. El diagrama de la conexión del módulo CC3200 puede observarse en la Figura 8 al igual que el diagrama de las Raspberry.

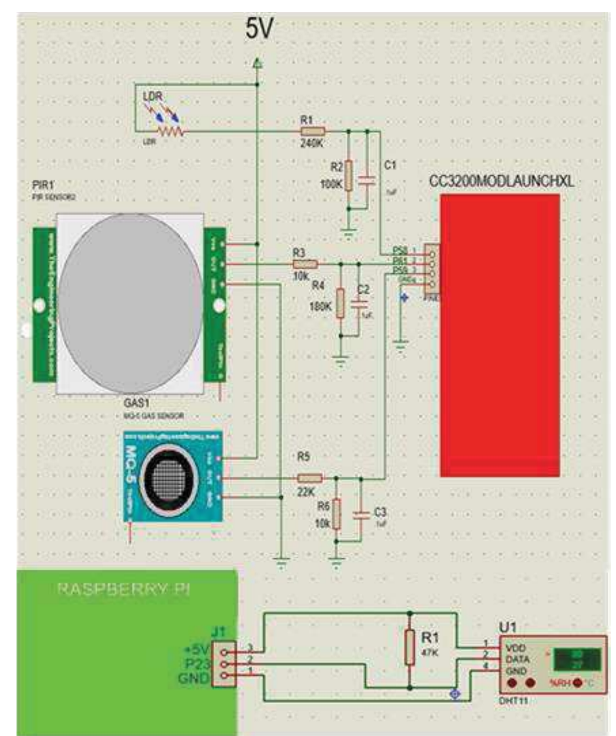


Figura 8. Diagrama de conexión entre los módulos CC3200, la Raspberry y los sensores PIR, MQ5, LDR y DHT11 .

Los valores de luz que nos aportaba el LDR en un comienzo se convertían en porcentaje de iluminación, en una escala equivalente a los valores digitales 0-4095, pero esta escala sólo tiene valor didáctico, por lo que se optó por convertir los valores obtenidos a luxes, una medida internacional que nos indica la cantidad de iluminación que llega a una superficie concreta. Para lograr esto se tomaron muestras con un luxómetro MeterShack modelo DT-1309 y un multímetro digital, de tal forma que se medía la cantidad de voltaje que entraba al microcontrolador por parte del LDR en relación con la cantidad de luxes que recibía. Estos valores se analizaron en MATLAB y se generó una aproximación exponencial al comportamiento del voltaje en relación a los luxes, dicha gráfica puede observarse en la Figura 9. La ecuación 1, generada por MATLAB se programó en el CC3200 con los valores de entrada del convertidor. De esta forma se obtuvo una medición con mayor peso en el mundo real.

$$f(x) = a * e^{(b*x)} \quad (1)$$

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Donde a=20.13, b=-9.371 y x=Son los valores de voltaje ingresados al micro controlador.

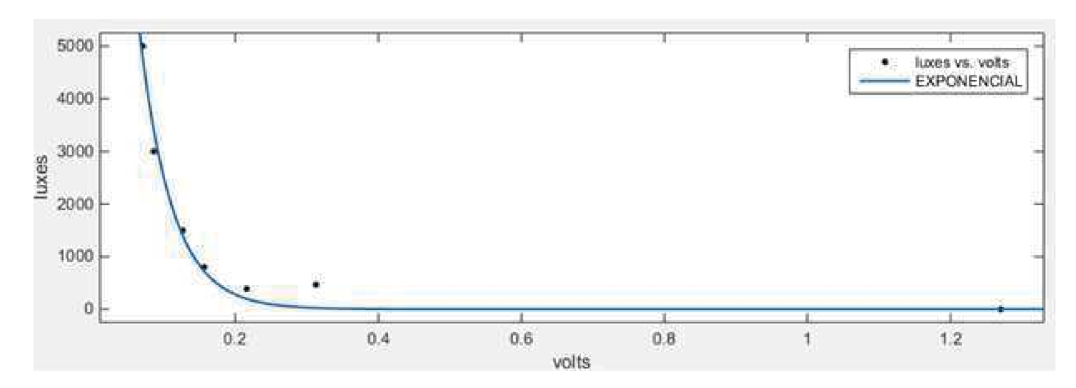


Figura 9. Gráfica de equivalencia volts - luxes.

6. Resultados

Como se mencionó anteriormente 7 clientes con distintos sensores fueron instalados en una red local para el monitoreo de temperatura, humedad, luminosidad y presencia. En la Figura 10 se muestra la instalación de los dispositivos dentro del ambiente a monitorear.

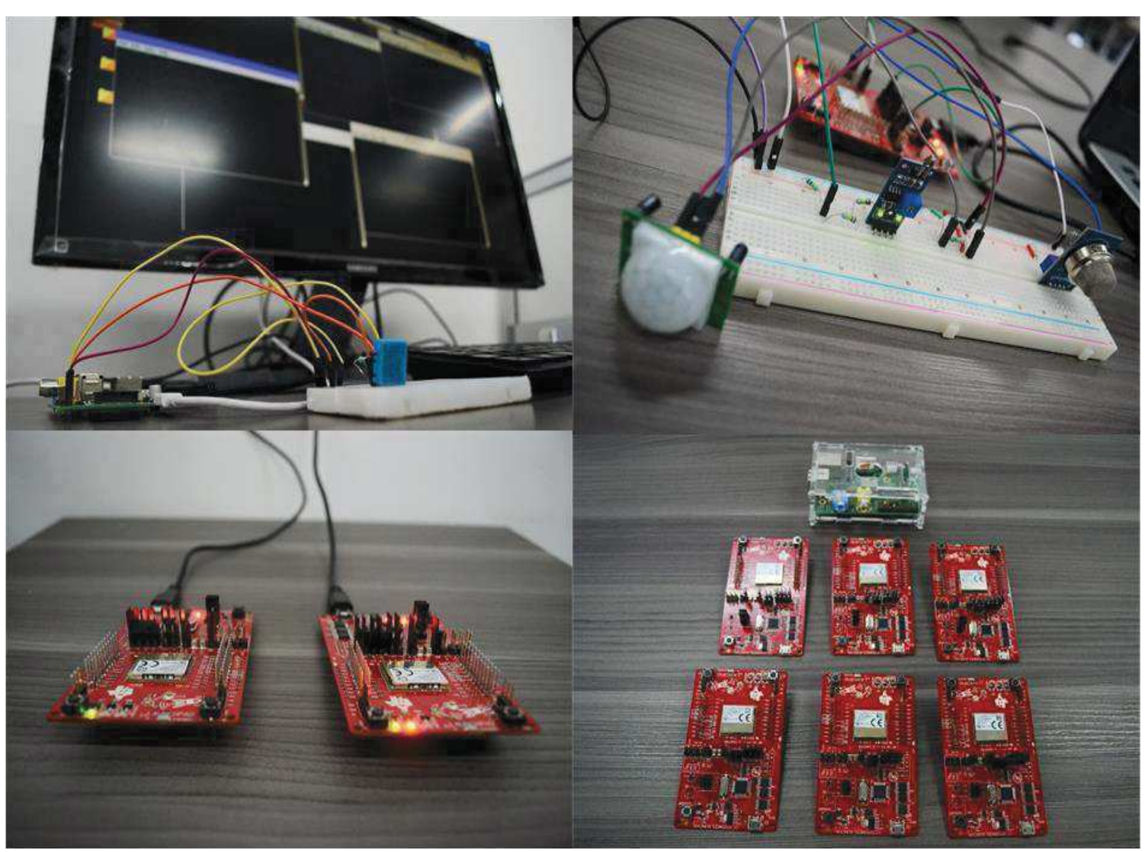


Figura 10. Distintos clientes utilizados en la red.

Es importante mencionar que en todos los clientes es indispensable definir la dirección IP del bróker y el número de puerto, el protocolo MQTT suele utilizar como estándar el puerto 1883 y es el que se decidió utilizar. Por default todos los clientes CC3200 tienen el mismo Identificador único lo que

ISBN: 978-607-9394-14-1.



crea un conflicto si se desea conectar más de dos dispositivos en la red, por lo que es necesario tener ID's diferentes para cada dispositivo.

Los datos recolectados por los sensores son almacenados dentro de una base de datos MySQL dentro de la Raspberry, dicha base de datos almacena la hora en que cada dato es registrado por lo que se puede realizar un histórico de los datos. Se puede acceder de manera remota a la base de datos, pero para mejorar la experiencia del usuario se decidió crear una página web que desplegará gráficas de los valores históricos almacenados en la Raspberry, para crear la vista (front-end) se utilizó HTML5 y javaScript junto con una librería para creación de gráficas llamada *plotly* (librería que nos permite interactuar con múltiples herramientas como la exportación de imágenes, zoom, corrimiento, entre otros). Debido a que la página se encuentra en el broker y la base de datos en la Raspberry se necesita establecer una conexión, para ello se debe crear un usuario que permita un acceso vía remota. Como se puede observar en la Figura 11 cuando el cursor pasa por algún punto de la gráfica se resalta el valor del sensor en el tiempo seleccionado.

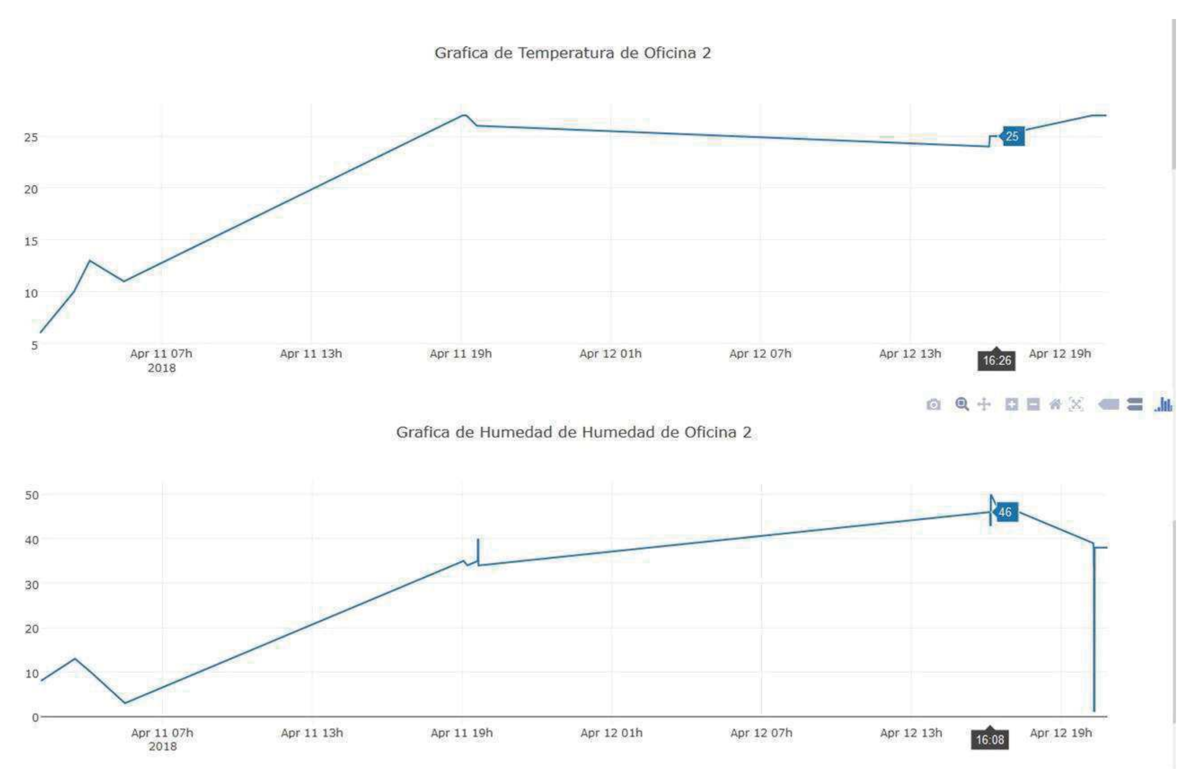


Figura 11. Visualización histórica de los sensores de temperatura y humedad.

También existe una visualización de consola dentro del *broker* (no obstante puede re-dirigirse a cualquier cliente), que permite monitorear en tiempo real los datos publicados por cada cliente, recordando que no solo se puede observar la actividad de los sensores, sino que también se puede observar si en algún cliente CC3200 se le ha presionado un botón y el tópico en el que fue publicado cada dato. La consola de mensajes puede observarse en la Figura 12.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



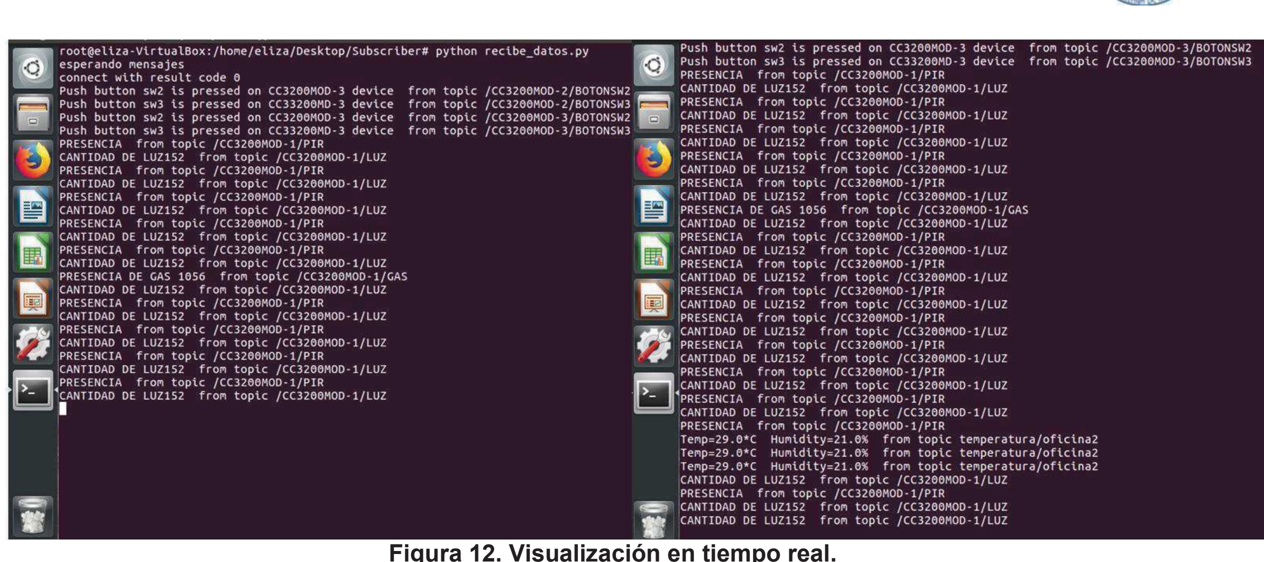


Figura 12. Visualización en tiempo real.



El protocoló MQTT permitió la interconexión con múltiples dispositivos de diferentes arquitecturas y prestaciones, sin restarle velocidad a la red, pues MQTT ocupa muy poco ancho de banda. Razones por las cuales se recomienda ampliamente su uso en aplicaciones de IoT. El hecho de ser un sistema *publish/subscribe* basado en tópicos, permite una mejor clasificación de los elementos presentes en la red de sensores inalámbrica, ya que se pueden agrupar de distintas maneras como ubicación física, funcionalidad, prioridad o de la manera en que nos sea más conveniente. Otra de las muchas bondades de usar tópicos es que, la asignación de direcciones es relegada al DHCP y solo se espera a que el dispositivo se subscriba a un tópico, sin tener que configurar el espacio de direcciones.

La visualización de los datos históricos fue pensada en una página web para que el usuario pueda acceder desde cualquier dispositivo inteligente y así monitorear en todo momento el comportamiento de los sensores.

7. Conclusiones y trabajo futuro

Las redes de sensores inalámbricas y el IoT necesitan un protocolo de comunicación que permita la conexión de múltiples dispositivos de bajo costo, bajo consumo de energía y/o en una red con alta latencia, por lo que el protocolo HTTP no es una opción viable pues se comunica de una manera síncrona y requiere que los clientes esperen que el servidor responda cualquier solicitud, lo que trae consigo dificultades para su escalabilidad. Dentro de los diversos protocolos existentes enfocados a IoT, se encuentra MQTT, un protocolo que utiliza un sistema *publish/subscribe* orientado a tópicos con 3 elementos fundamentales un *subscriber* (elemento en la red que se subscribe a un tópico y adquiere la información), un *publisher* (elemento en la red que se publica información a un tópico) y un *broker* (un intermediario de mensajes) sin necesidad de una dirección fija. Entre las ventajas que ofrece destacan: el poco uso de banda ancha, alta escalabilidad y la diversificación de distintos dispositivos.

Además, se diseñó e implementó una red de sensores usando dispositivos muy distintos (en arquitecturas, lenguajes, librerías, y otros), lo que nos muestra la gran versatilidad del protocolo MQTT. En futuras mejoras del proyecto, se pretende aumentar la cantidad de dispositivos y sensores conectados, también se pretende incluir medios de seguridad adicional (como usuario y contraseña), además de mejorar las alertas emitidas gracias a datos de distintos sensores de grado industrial.

Referencias

[1] Othman, M. F., & Shazali, K. (2012). Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, *41*, 1204-1210.

[2] Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R., & Khan, S. (2012, December). Future internet: the internet of things architecture, possible applications and key challenges. In *Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on* (pp. 257-260). IEEE.

[3] International Electrotechnical Commission. (2014, 11 01). *Internet of Things: Wireless Sensor Networks*. IEC.. Obtenido de International Electrotechnical Commission. Revisado por última vez el 2 de abril del 2018 en: https://webstore.iec.ch/publication/22377#additionalinfo

[4] YANG, S. (2016). WIRELESS SENSOR NETWORKS(1st ed.). London: Springer-Verlag. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5505-8

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[5] MIT. (2003, Febrero). 10 Emerging Technologies That Will Change the World. Revisado por última vez el 2 de abril del 2018 en: http://www2.technologyreview.com/news/401775/10-emerging-technologies- that-will-change-the/

[6] Kopetz, H. (2011). Internet of things. In Real-time systems (pp. 307-323). Springer, Boston, MA.

[7] GSMA. (2014, Julio). Understanding the Internet of Things (IoT) - GSMA.Revisado por última vez el 4 de abril del 2018 en: https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2014/08/cl_iot_wp_07_14.pdf

[8] D. Evans, “The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything,” 2011.

[9] IBM. (2014, July). Conozca MQTT.Revisado por última vez el 9 de abril del 2018 en: https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/index.html

[10] HIVEMQ. MQTT essentials.Revisado por última vez el 9 de abril del 2018 en: https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/

[11] MQTT v3.1.1 (estándar OASIS oficial). Revisado por última vez el 9 de abril del 2018 en: http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 579-592.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Análisis Cinemático, Validación Experimental y Propuesta de Diseño Mecánico de un Dispositivo de Rehabilitación Adaptable para los Dedos de la Mano DReAM

Rodríguez León Jhon Freddy[1], Aguilar Pereyra José Felipe[2] y Castillo Castañeda Eduardo[1]

[1]Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, Instituto Politécnico Nacional, 76090 Querétaro, Qro, México.
[2]División de Tecnologías de Automatización e Información, Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, Qro, México.

Resumen

*El presente documento describe el análisis cinemático, validación experimental y propuesta de diseño mecánico de un dispositivo de rehabilitación adaptable para los dedos de la mano **DReAM**. Este proyecto surge a partir del análisis y evaluación del estudio realizado por el Doctor en tecnología Avanzada José Felipe Aguilar Pereyra, el cual propone un sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de la mano, basado en el uso de un mecanismo R-RRT tipo manivela corredera para la movilización del dedo índice al meñique. Por tanto, con base en los resultados obtenidos del análisis cinemático y de la validación del sistema robótico, se propone el diseño de **DReAM** que cumpla con la generación del movimiento natural de flexoextensión para los dedos largos de la mano controlados en amplitud y velocidad a partir de una posición inicial establecida por el usuario. Dispositivo desarrollado en Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional.*

Palabras clave: Flexoextensión, dispositivo de rehabilitación, sistema robótico.

1. Introducción

El instituto nacional de estadística y geografía de México, INEGI, en un interesante estudio refiere que, por ejemplo, el 80% de las personas con discapacidad viven en países en vía desarrollo y que la mayoría no tiene acceso a servicios de atención médica de alta especialización. Se estima que un 10% de la población mundial, unos 650 millones de personas, presentan algún tipo de deterioro o discapacidad [1].

Los mencionados incrementos en la población mundial que sufre alguna discapacidad implican desde luego, un aumento de los casos particulares de discapacidades relacionadas con la movilidad de los dedos de la mano. Un caso particular en Colombia es registrado por la Universidad del Quindío [2], en el que se detalla para una población regional muestreada en los centros de rehabilitación y clínicas que cuentan con áreas de terapia, que los niños menores de 10 años por lo general asisten por fracturas y que las personas mayores de 15 años por lesiones de primer y segundo grado.

Entre las diversas discapacidades que puede sufrir el ser humano, las que afectan la motricidad fundamental de la mano, son de especial atención. En efecto, la mano del hombre es uno de los órganos más complejos de su cuerpo, después del cerebro. Esto ha llevado a que en las últimas décadas haya sido objeto de estudio y de investigación, no sólo en el campo médico, sino también en el campo de la ingeniería [3].

ISBN: 978-607-9394-14-1.



La mano constituye un órgano extremadamente complejo morfológicamente, debido a que está conformado por muy disímiles estructuras y articulada por los dedos índice, anular, medio y meñique llamados dedos largos, además del dedo corto, único y proximal llamado pulgar [1]. Cada uno de ellos se caracteriza por estar compuesto por tres falanges, excepto el dedo pulgar que solo tiene dos [4]. Los dedos de la mano cumplen la función de realizar tareas de fuerza y presión. Además, tiene la capacidad de detectar texturas, pueden registrar sensaciones como calor o frio y sostener objetos. Para realizar estas actividades ejecuta movimientos como flexión, extensión, aducción y abducción [5].

Actualmente la incapacidad funcional producida por la pérdida del pulgar se evalúa en un 33%, siendo esta tan severa como la pérdida de un ojo. Sin embargo, la pérdida de alguno de los otros dedos se evalúa entre un 10% a un 15%. Para los dedos índices y medio se evalúa en un 15% y para los dedos anular y meñique con un 10% [6]. Entre las diversas enfermedades que puede sufrir el ser humano, las que afectan la motricidad fundamental de la mano, son de especial atención. En efecto, la mano del hombre es uno de los órganos más estudiados del cuerpo, después del cerebro. Esto ha llevado a que en las últimas décadas haya sido objeto de análisis e investigación, no sólo en el campo médico, sino también en el campo de la ingeniería [7].

Los instrumentos más usados en los procesos de rehabilitación están basados en férulas de Stack, ortesis pasivas y activas; éstas se adaptan a las articulaciones interfalángicas proporcionando presiones mediante diferentes apoyos o controlando los movimientos de Flexoextensión de los dedos [8]. Además de los instrumentos de uso manual, existen también equipos especializados para asistir en la terapia de rehabilitación. Sin embargo, estos sistemas automáticos son de un alto costo, esto los convierte en dispositivos inaccesibles para muchas de las instituciones públicas que no cuentan con altos recursos. Un ejemplo de estos sistemas es el llamado Amadeo®, comercializado por la empresa austriaca Tyromotion. Este dispositivo se caracteriza por asistir en la terapia de rehabilitación para los dedos de la mano, su precio en el mercado está alrededor de los 43.000 euros [9].

Por tanto, se presenta la descripción del diseño propuesto por Dr. José Felipe Aguilar Pereyra, titulado Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de la mano [10], el cual propone el diseño de un mecanismo capaz de generar los movimientos de flexoextensión. Además, se realiza el análisis cinemático con su respectiva simulación. Con base en los resultados obtenidos del análisis cinemático, se realiza la validación del sistema robótico mediante el procesamiento de imágenes haciendo uso del método desarrollado por [11] para la adquisición de la trayectoria que genera el efector final. También, se realiza la implementación de un sistema de control que pueda generar los movimientos de flexoextensión. El objetivo es validar el funcionamiento del sistema robótico propuesto por [10], para luego proponer el diseño de **DReAM** en función de los problemas encontrados.

2. Descripción del sistema robótico

El sistema está compuesto por cuatro mecanismos de cuatro barras tipo manivela - corredera (Rotacional, Rotacional, Rotacional, Traslacional. **R-RRT**) para la movilización de los dedos índice al meñique. El Mecanismo de cuatro barras tipo manivela corredera con un grado de libertad (**GLD)** es capaz de reproducir la trayectoria que genera la punta de cada uno de los dedos largos de la mano. En la Figura 1 se ilustra el sistema robótico.

La síntesis de los mecanismos flexo-extensores se realizó a partir de un método de generación de trayectoria con tres puntos de precisión con base en las curvas del eslabón acoplador [12]. Una restricción importante, es que la longitud de la extensión del eslabón acoplador sea siempre mayor o igual a la longitud máxima de la manivela; lo anterior para evitar que la unión del dedo del usuario y el mecanismo choquen. El mecanismo de rehabilitación cumple con la función de movilizar las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximal y distal de los dedos índices al meñique.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 579-592.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Este movimiento lo realiza mediante la orientación del extremo distal de cada dedo por la trayectoria natural de Flexoextensión. Lo anterior cumple con el objetivo de evitar que el movimiento del dedo se realice fuera de su espacio de trabajo.

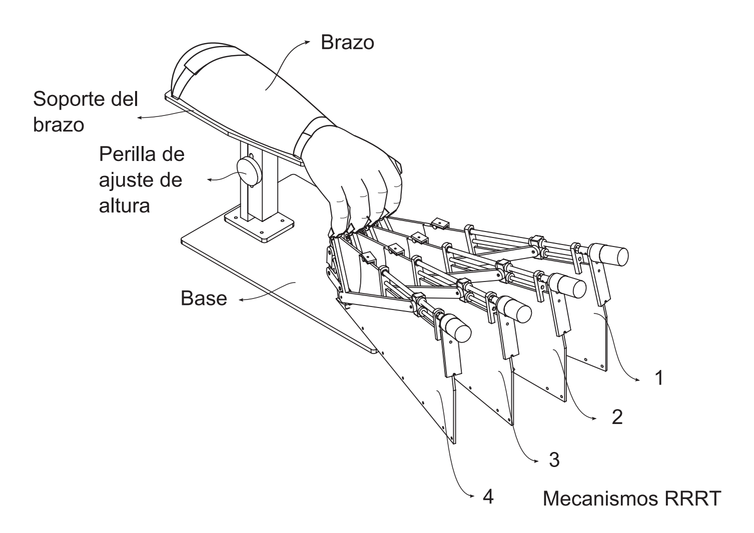


Figura 1. Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación.

Los ejercicios que puede ofrecer el mecanismo para movilizar los dedos son de tipo pasivo y activo. Es decir, el mecanismo tiene la capacidad de ejercer fuerza de movilidad hacia el dedo, esto para el caso de pasivo, para el caso de activo, el paciente puede agregar fuerza para generar el movimiento de Flexoextensión.

2.1 Generación de la trayectoria del sistema robótico

La trayectoria está definida por el límite de flexión hasta el límite de extensión, durante este trayecto se reproduce el movimiento de Flexoextensión. Los movimientos seguros, suaves y continuos en el tiempo, se realizan mediante la adquisición de señales proporcionadas por *encoders* incrementales anclados a los motores y tarjetas de adquisición de datos. En la Figura 2 se observa el esquema del mecanismo.

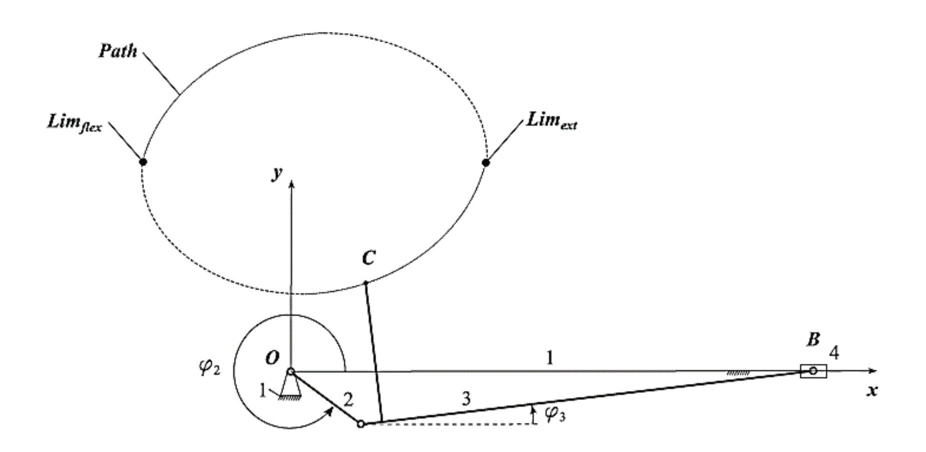


Figura 2. Esquema del mecanismo propuesto.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



En la Figura 2, se ilustran los límites de flexión y extensión que puede genera el mecanismo sin provocar problemas de hiperextensión. Es importante tener en cuenta que, para movilizar cada uno de los dedos de la mano, se debe analizar el ángulo que genera la manivela y la distancia recorrida por la corredera. Esto con el objetivo de verificar en los métodos de simulación, el correcto funcionamiento del mecanismo.

3. Análisis cinemático en posición.

El análisis cinemático se realiza aplicando el método analítico de números complejos, por tanto, se realiza el esquema vectorial que describe al mecanismo. A continuación, en la Figura 3 se muestra el análisis vectorial del mecanismo.

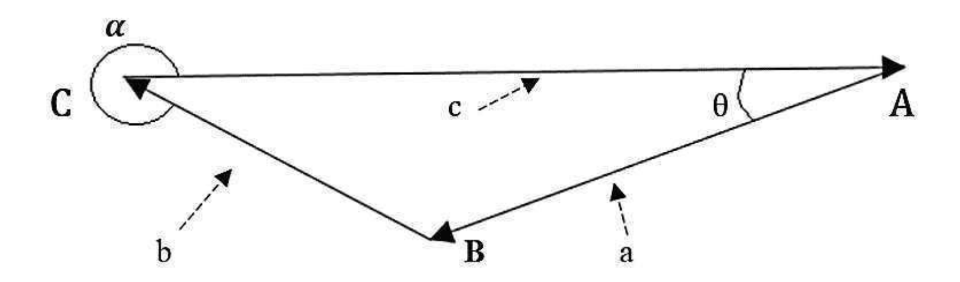


Figura 3. Análisis vectorial.

En el esquema anterior, se observan los vectores que conforman el mecanismo. Siendo **a** el vector que va desde el punto **A** hasta el punto **B** y **b** el vector que va desde el punto **B** hasta el punto **C**. Para el vector **c**, este corresponde al valor que desplaza la corredera y que va del punto **C** al punto **A**. En este caso el vector está restringido por los límites de Flexión y extensión que genera el mecanismo y que representan la entrada del sistema, ver Figura 4. Las medidas de cada uno de los eslabones fueron obtenidas bajo el criterio del trabajo tesis [10]. De modo que, con estos datos se pueden obtener las posiciones de los vectores.

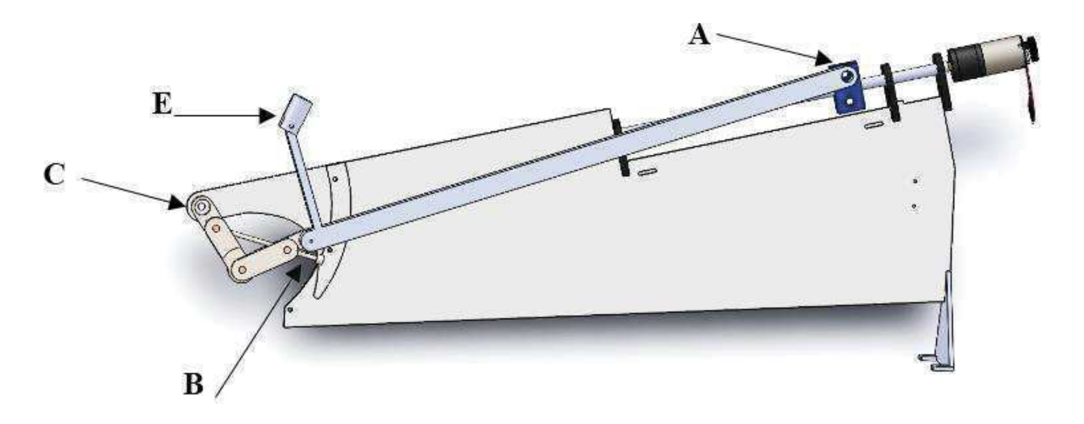


Figura 4. Puntos de interés del mecanismo.

El análisis cinemático parte de la ecuación [1], donde las variables a calcular son $\boldsymbol{\theta}$ y α:

ISBN: 978-607-9394-14-1.



$$c = ae^{i\theta} + be^{i\alpha} \quad [1]$$
$$c = ae^{-i\theta} + be^{-i\alpha} \quad \text{(Complejo conjugado)}$$

Teniendo en cuenta que los valores de los vectores **a**, **b** y **c** son conocidos, se planteó la ecuación [1] y con base en ella, se obtiene el complejo conjugado. Por tanto, se despeja la variable **b**, ver ecuación [2].

$$be^{i\alpha} = \mathrm{c} - ae^{i\theta} \quad [2]$$
$$be^{-i\alpha} = \mathrm{c} - ae^{-i\theta} \text{ (Complejo conjugado)}$$

Se resuelve para encontrar el valor de $\boldsymbol{\theta}$, por tanto, se obtiene:

$$b^2 = c^2 + a^2 - ace^{-i\theta} - ace^{i\theta}$$
$$b^2 = c^2 + a^2 - \mathrm{ac}\cos(\theta) + \mathrm{ac}\ i\mathrm{sen}(\theta) - \mathrm{ac}\cos(\theta) - \mathrm{ac}\ i\mathrm{sen}(\theta)$$
$$b^2 = c^2 + a^2 - \mathrm{ac}\,[\cos(\theta) - i\mathrm{sen}(\theta) + \cos(\theta) + i\mathrm{sen}(\theta)]$$
$$b^2 = c^2 + a^2 - 2\mathrm{ac}\cos(\theta) \quad [3]$$

Se obtiene para $\boldsymbol{\theta}$ la siguiente ecuación:

$$\theta = arc\cos\ [\frac{b^2 - c^2 - a^2}{-2ac}] \quad [4]$$

Para obtener el valor de $\boldsymbol{\alpha}$ se realiza el mismo procedimiento, pero teniendo en cuenta que para este caso se despeja **a** como se muestra en la ecuación [5].

$$ae^{i\theta} = \mathrm{c} - be^{i\alpha} \quad [5]$$
$$ae^{-i\theta} = \mathrm{c} - be^{-i\alpha} \text{ (Complejo conjugado)}$$

Se resuelve para encontrar el valor de $\boldsymbol{\alpha}$, por tanto, se obtiene:

$$a^2 = c^2 + b^2 - bce^{-i\alpha} - bce^{i\alpha}$$
$$a^2 = c^2 + b^2 - \mathrm{bc}\cos(\alpha) + \mathrm{bc}\ i\mathrm{sen}(\alpha) - \mathrm{bc}\cos(\alpha) - \mathrm{bc}\ i\mathrm{sen}(\alpha)$$
$$a^2 = c^2 + b^2 - \mathrm{bc}\,[\cos(\alpha) - i\mathrm{sen}(\alpha) + \cos(\alpha) + i\mathrm{sen}(\alpha)]$$
$$a^2 = c^2 + b^2 - 2\mathrm{bc}\cos(\alpha) \quad [6]$$

Se obtiene para $\boldsymbol{\alpha}$ la siguiente ecuación:

$$\alpha = arc\cos\left[\frac{a^2 - c^2 - b^2}{-2bc}\right] - 360 \quad [7]$$

En este caso se le resta 360º, porque se está tomando el ángulo interno del $\boldsymbol{\alpha}$.

Obtenidas las anteriores ecuaciones, se hace uso de **Matlab** para simular el comportamiento del mecanismo.

3.1 Simulación cinemática directa en posición del sistema robótico.

Para el desarrollo de la simulación, se obtienen los datos de los eslabones calculados en el trabajo de tesis [10]. Se debe tener en cuenta que existe una distancia **B`**, que es la distancia de la articulación rotacional al origen del efector final. En la Figura 5 se observa la distancia **B`**.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



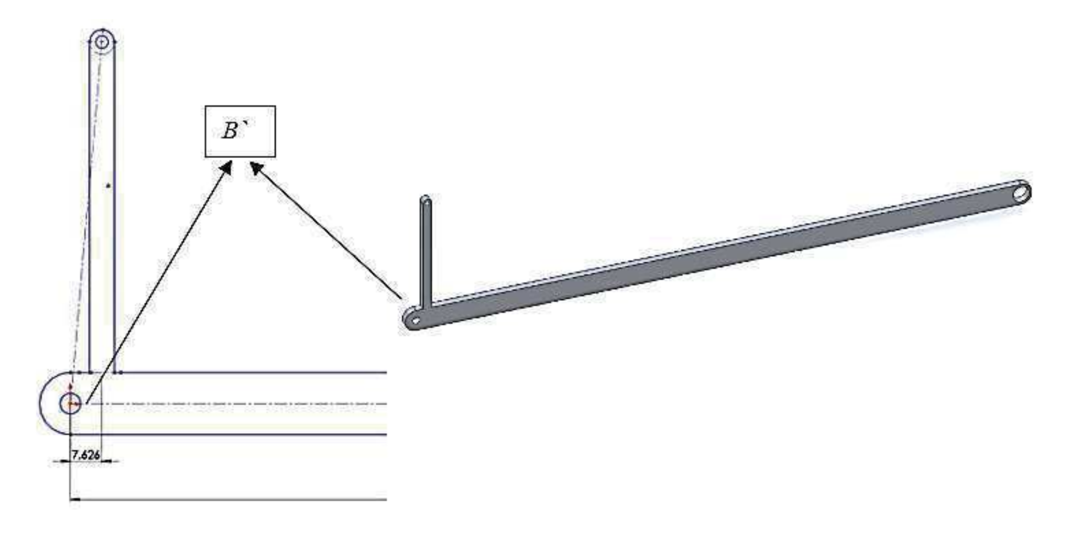


Figura 5. Distancia de la articulación rotacional al origen del efector final.

Las longitudes de los eslabones son:

- a=411.19 [mm] eslabón AB unido a la corredera
- b=50 [mm] longitud BC ajustable
- cf=368.04 [mm] longitud AC en flexión
- ce=463 [mm] longitud AC en extensión
- BpE=87.17 [mm] longitud de B' al efector final E
- BBp=7.63 [mm] longitud de B a B'

Teniendo en cuenta los datos anteriores e implementando el código desarrollado en Matlab para simular el comportamiento del sistema robótico, se obtiene la Figura 6, en la cual se ilustra el esquema vectorial del mecanismo.

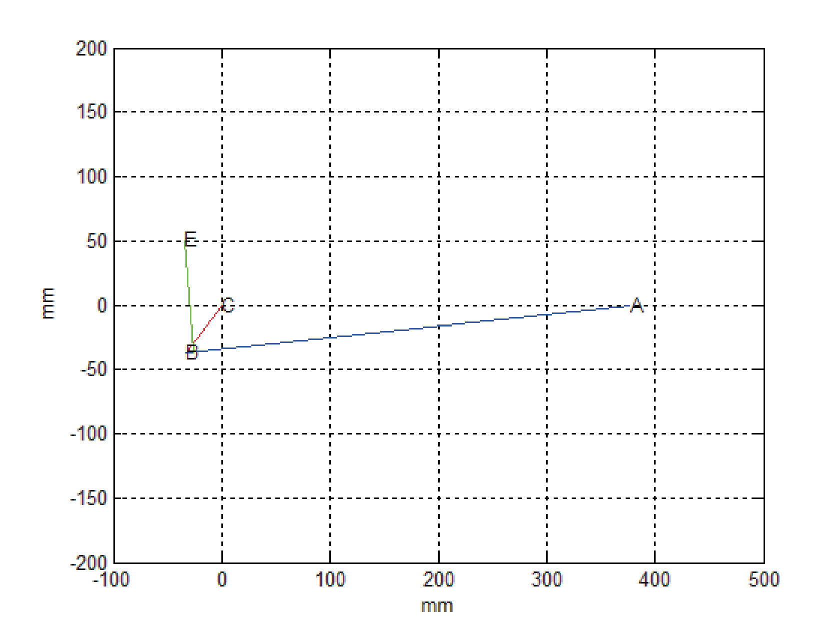


Figura 6. Esquema vectorial del mecanismo

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Además, se agrega el eslabón del efector final al vector **a** con una distancia **B`,** este nuevo eslabón es definido como eslabón acoplador. A continuación, en la Figura 7 se ilustra el esquema vectorial del sistema robótico con distancia definida del eslabón acoplador.

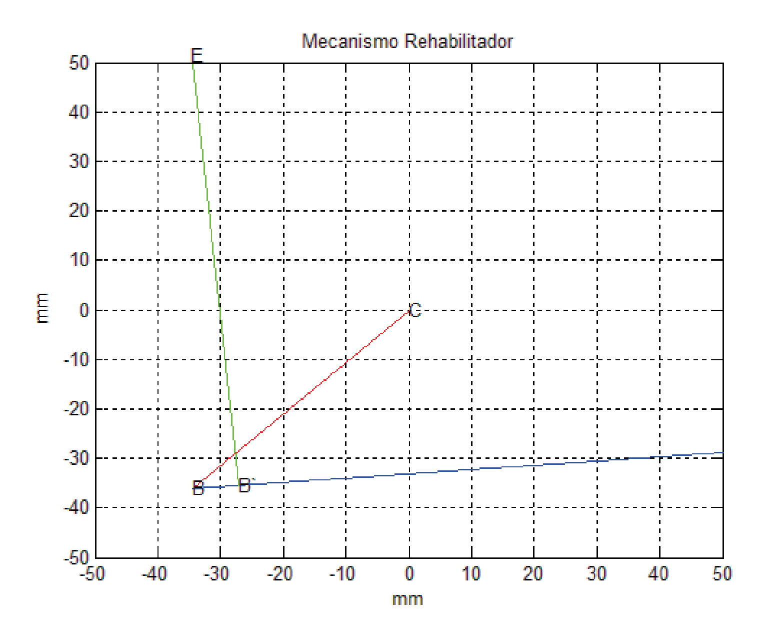


Figura 7. Esquema vectorial del sistema robótico con distancia definida del eslabón acoplador.

Realizada la simulación del mecanismo, se grafica la trayectoria que se está generando para una entrada de carrera de 94.9600mm para generar el movimiento de flexoextensión, ver Figura 8.

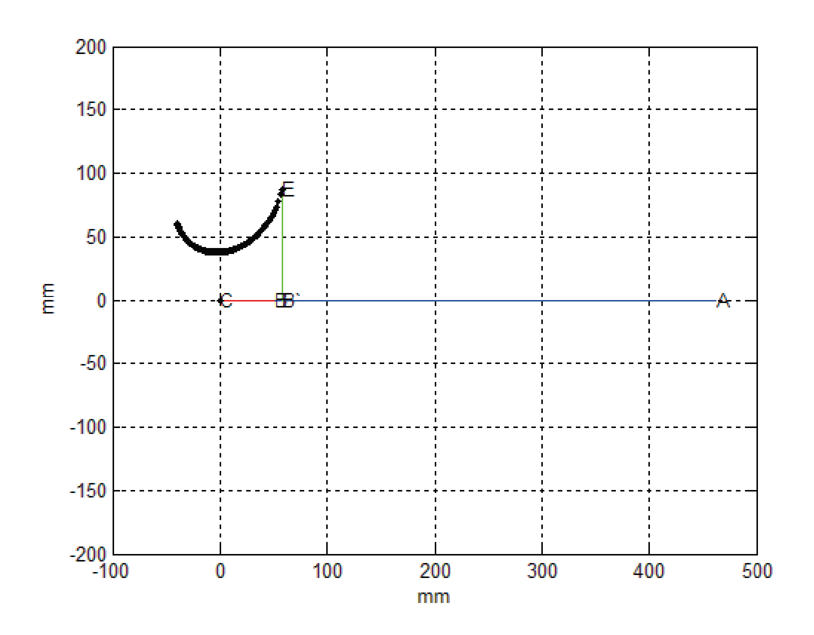


Figura 8. Trayectoria generada por el mecanismo

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 579-592.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Los datos obtenidos de la simulación representan un mecanismo que está en el plano sin ningún ángulo de inclinación. Por tanto, para obtener los datos reales se debe inclinar el mecanismo 0.3490 Radianes o 20º [10]. Esta inclinación se realiza aplicando la matriz de rotación en el eje **z** para inclinar la trayectoria. A continuación, en la ecuación [8] se ilustra la matriz de rotación en **z**.

$$\lambda = 0.3490 \text{ Radianes}$$
$$Matrix_rotación = \; [cos(\lambda) \; -sin(\lambda) \; 0 \; ; \; sin(\lambda) \; cos(\lambda) \; 0 \; ; \; 0 \; 0 \; 1 \,] \qquad [8]$$

Aplicando la anterior matriz de rotación a los datos obtenidos en la simulación, se calculan las trayectorias que se muestran en la Figura 9, donde se observa la trayectoria calculada y la trayectoria aplicándole la rotación en el eje **z**.

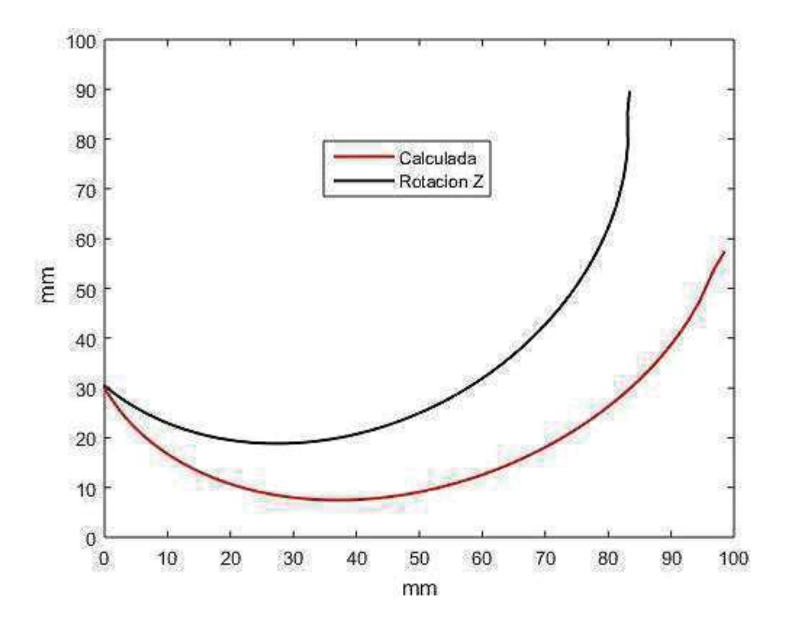


Figura 9. Trayectoria calculada y la trayectoria aplicándole la rotación en el eje z.

Realizado el análisis cinemático para simular la trayectoria que genera el mecanismo, se continua con la construcción del sistema robótico para validar su funcionamiento con base en el análisis de trayectorias.

4. Validación del sistema robótico.

Para la validación del sistema robótico desarrollado por [10], se realiza el análisis de procesamiento de imágenes haciendo uso del método desarrollado por [11] para la adquisición de la trayectoria que genera el efector final, punto **C**. Además, el objetivo de la validación es verificar el correcto funcionamiento de: diseño mecánico, sistema de control y trayectoria generado por el efector final. Sin embargo, se valida el funcionamiento de uno de los cuatro mecanismos, ya que estos tienen la misma configuración. En la Figura 10 se muestra el dibujo de uno de los mecanismos propuestos por [10]. Como primer paso en el proceso de validación experimental, se realiza el control del mecanismo para generar las trayectorias de flexión y extensión. Debido a que los actuadores que producen el movimiento de los mecanismos flexoextensores son servomotores de corriente directa, se seleccionó el sistema de control *PicServo®*, ver Figura 11. Este sistema comercial consiste en una

ISBN: 978-607-9394-14-1.



tarjeta de comunicación SSA-485 *Smart Serial Adapter* y una tarjeta controladora de movimiento *PIC-SERVO SC Motion Control Board.*

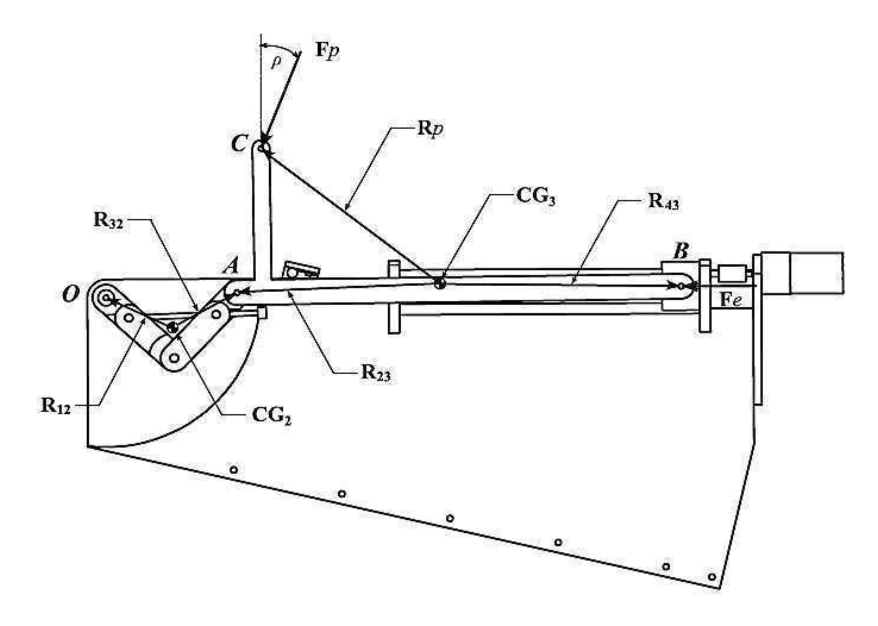


Figura 10. Mecanismo para un dedo.

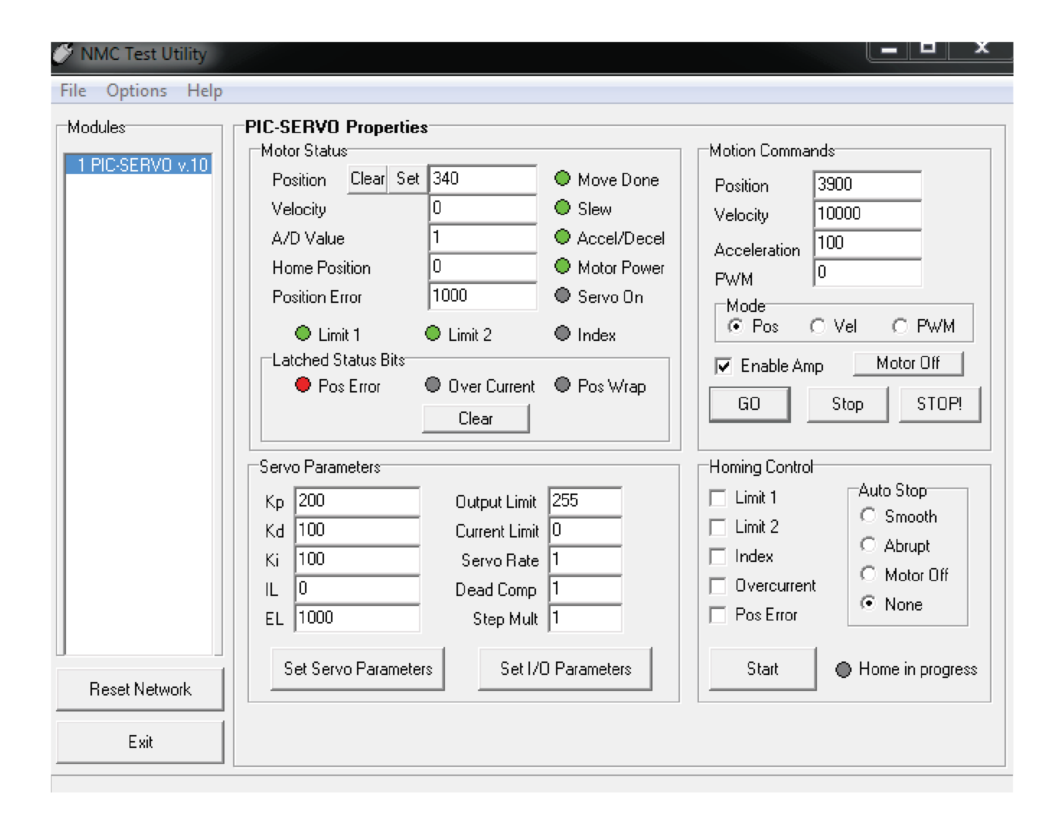


Figura 11. Interfaz PicServo®.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



Se instalaron interruptores de fin de carrera en los extremos de la trayectoria de la corredera para limitar su desplazamiento. Posteriormente, se programan los movimientos controlados de flexoextensión en el mecanismo y se hace uso del método de análisis de imágenes para la adquisición de la trayectoria. Por tanto, se realiza la toma de videos correspondientes a las trayectorias de flexoextensión y mediante software se hace la respectiva descomposición de los videos en imágenes. Luego, se analizan cada una de las imágenes con el objetivo de detectar el efector final, ver Figura 12.

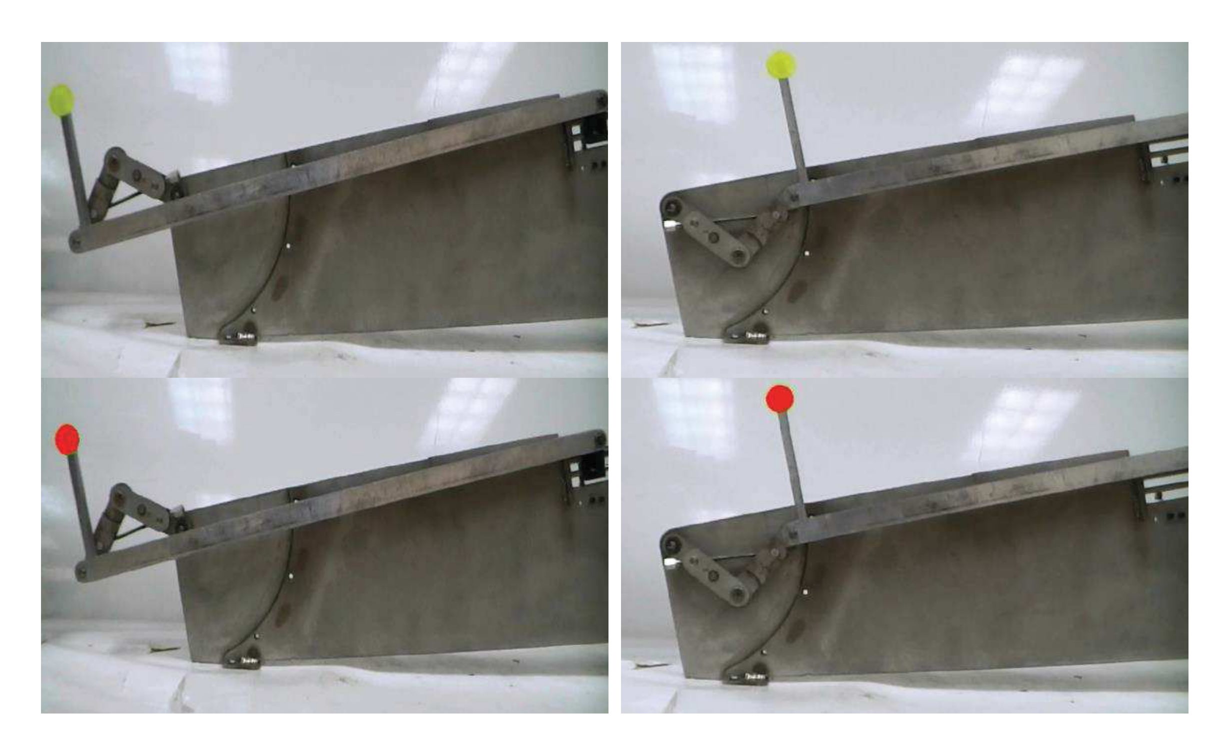


Figura 12. Identificación del punto C, (Efector final)

Con el punto **C** identificado, correspondiente al efector final en cada una de las imágenes. Se realiza la clasificación de este punto respecto de los demás datos de la imagen, para obtener la trayectoria generada. En la Figura 13 se ilustran las trayectorias de flexoextensión del mecanismo, de color negro se observa la trayectoria de los movimientos de flexión a extensión, y en color rojo la trayectoria de extensión a flexión.

Nótese que las trayectorias que genera el mecanismo son coincidentes a lo largo de los movimientos de flexión y extensión. Sin embargo, en su punto inicial de flexión, el mecanismo presenta juego mecánico debido a la estructura de la articulación. Otro de los problemas encontrados en el proceso de validación, fue que el eslabón acoplador colisiona con la base del mecanismo.

Además, se analizaron las posiciones en las coordenadas **x-y** del mecanismo respecto al tiempo de ejecución para los movimientos de flexión y extensión. En la Figura 14, se muestra la posición de la coordenada **x** de color negro, y de color rojo la posición de la coordenada **y**. El resultado obtenido es que la posición inicial del movimiento de flexión_extensión en las coordenadas **x-y**, es la posición final del movimiento extensión_flexión, y que la posición final del movimiento flexión_extensión en coordenadas **x-y**, es la posición inicial del movimiento de extensión_flexión. Es decir, que el mecanismo y el control implementado, tienen la capacidad de llegar a la posición programa sin errores.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 46, pp. 579-592.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



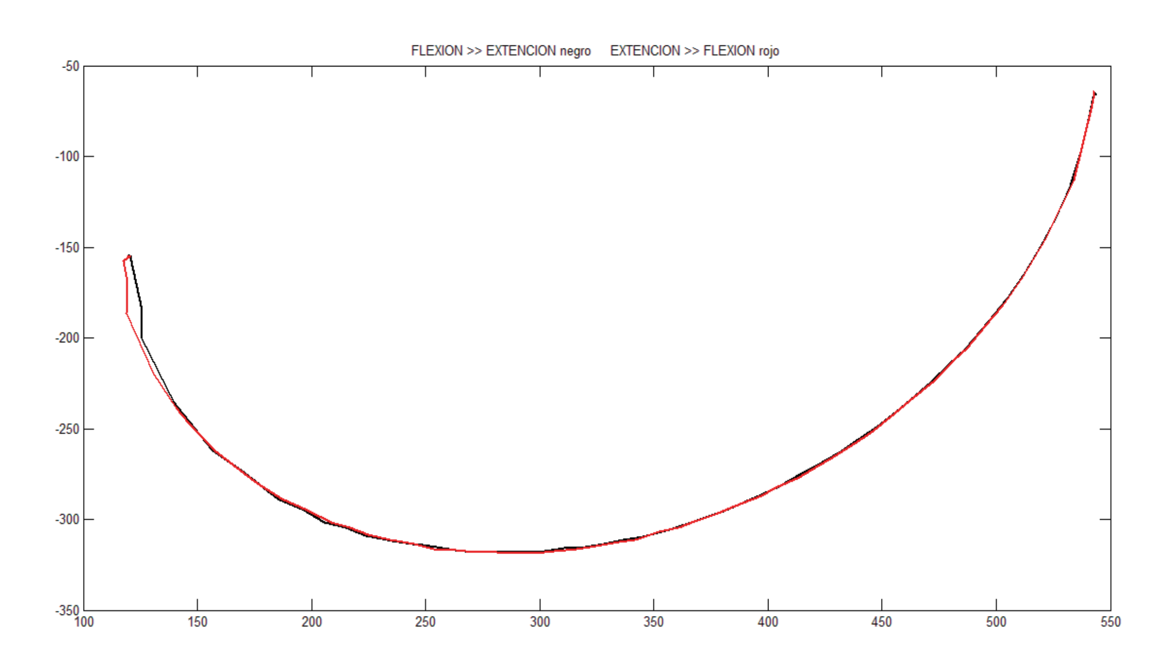


Figura 13. Trayectorias del mecanismo: movimientos de flexoextensión

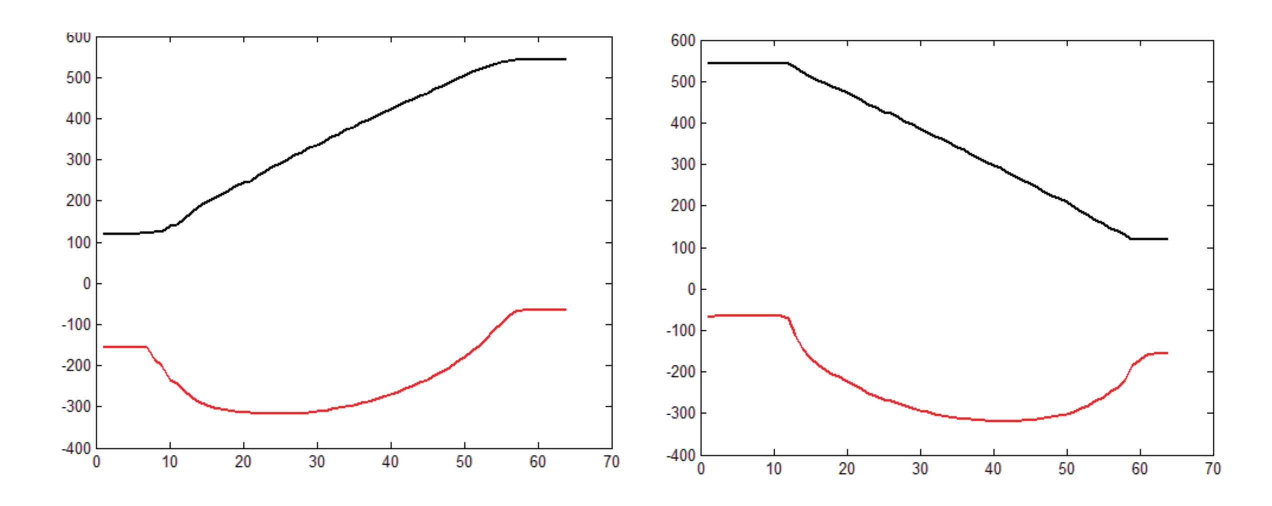


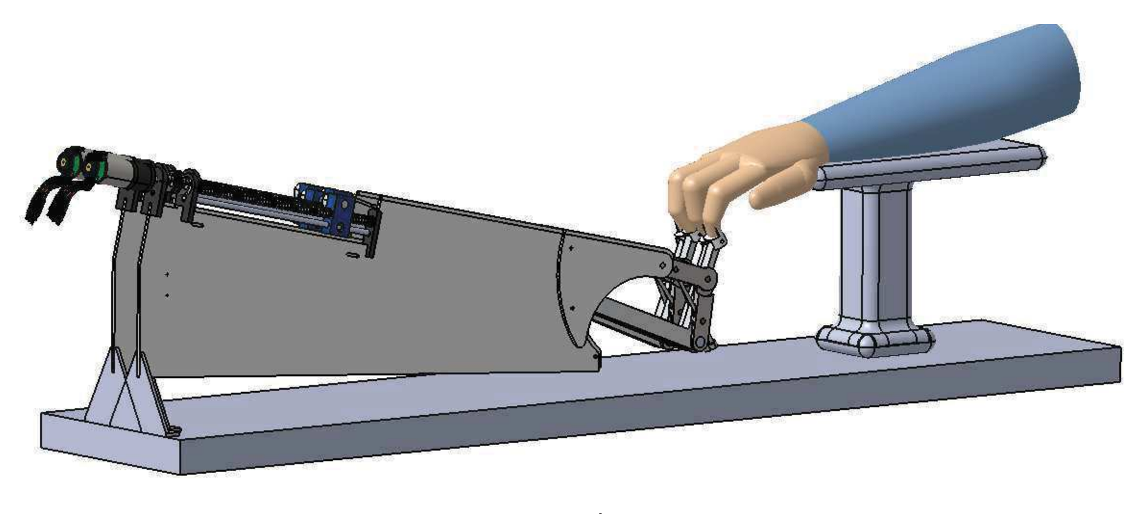
Figura 14. Coordenadas x-y respecto al tiempo de ejecución para los movimientos de flexoextensión.

5. Diseño de DReAM.

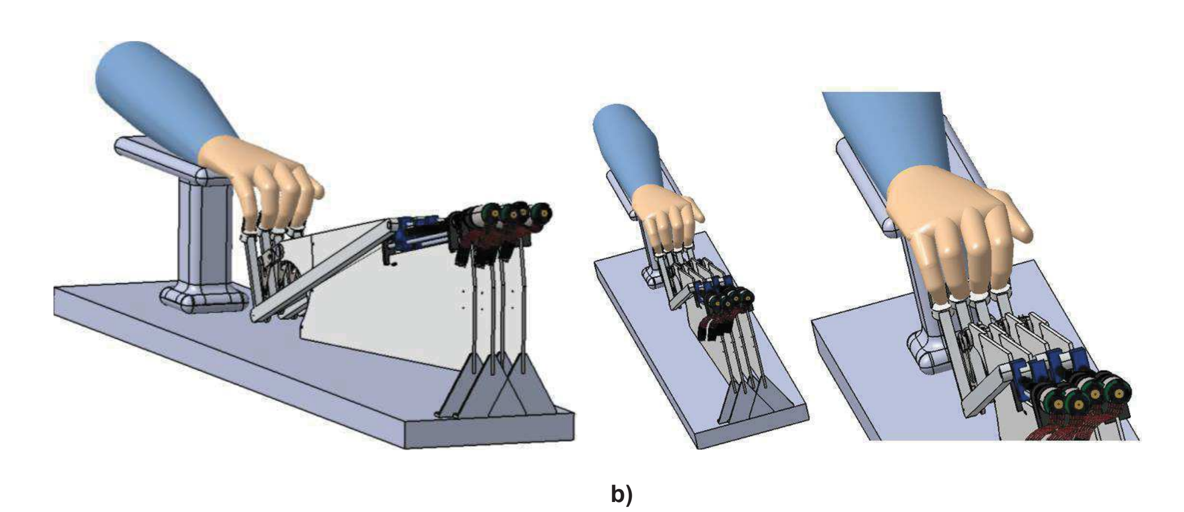
Analizando los movimientos de flexoextensión del sistema robótico, se encontró que la base fija del mecanismo se obstruye al movimiento de la biela, de modo que, se hizo un ajuste a las dimensiones de tal manera que el eslabón acoplador y la biela pudiera desplazarse en su espacio de trabajo calculado sin colisiones. En las Figuras 15a, 15b y 15c se muestra el diseño propuesto para **DReAM**, el cual propone solucionar los problemas encontrados en las previas pruebas.

ISBN: 978-607-9394-14-1.

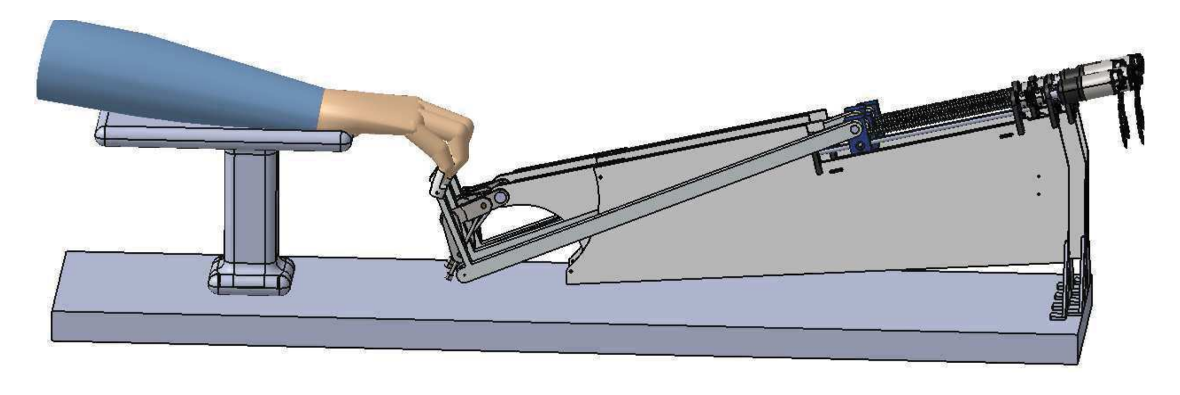




a)



b)



c)

Figura 15. CAD del diseño propuesto para DReAM

ISBN: 978-607-9394-14-1.



6. Conclusiones

Teniendo en cuenta el trabajo realizado en este documento, se tiene el objetivo de aportar un mejor desarrollo, seguro y confiable durante las terapias de rehabilitación de dedos de la mano. Es importante enfatizar que el sistema debe ser usado bajo estricta supervisión de un fisioterapeuta o personal médico capacitado, ya que dependiendo del diagnóstico del especialista se puede definir los grados de movilidad que el paciente requiere para su proceso de evolución.

DReAM fue diseñado con el propósito de generar los movimientos naturales de Flexoextensión de los dedos de la mano. Además, está caracterizado por que puede ser reconfigurable para distintos tamaños de los dedos, esto representa gran ventaja frente a los dispositivos que se encuentra actualmente en el mercado.

Otra ventaja está relacionada en la forma de la trayectoria que genera **DReAM**, ya que los mecanismos que están en el mercado, estos se basan en generar trayectorias lineales, que comparadas con la trayectoria que se presenta en este documento, se llegó a la conclusión que no coincide. De modo que, el mecanismo propuesto **DReAM,** tiene la capacidad de generar una trayectoria elíptica, esto implica realizar la validación en un trabajo a futuro. El cual validara el error de seguimiento de las trayectorias generadas por **DReAM** y las trayectorias generadas por los dedos largos de la mano.

El trabajo a futuro estará basado en conocer las trayectorias que generan de forma natural los dedos índices, medio, anular y meñique. De igual manera, conocer las trayectorias que generan los mecanismos correspondientes para los dedos antes mencionados, con el objetivo de validar sí las trayectorias generadas por los dedos están dentro del espacio de trabajo del dispositivo rehabilitador. Además, se debe diseñar una interfaz de usuario que pueda controlar la generación de las trayectorias en posición, velocidad, numero de ciclos de ejecución y movimientos independientes o sincronizados para cada uno de los mecanismos.

Referencias

[1] Pascual, J. "*Rehabilitación de la mano*", Universidad de ciencias Médicas de Guantánamo, páginas 17, 2014.

[2] Díaz, R. Vargas, A. "*Diseño de un dispositivo de apoyo en terapia pasiva para rehabilitación motora de mano y muñeca*", Informe Final - Trabajo De Grado, Universidad Del Quindío - Facultad De Ingeniería, 2011.

[3] Soto, M.; Jimmy W.; Gini, G. "*Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process*", Actas de la Academia Mundial de la Ciencia: Ingeniería y Tecnología; vol. 20, p85, 2007.

[4] Kapandji, A. "*Fisiología articular: esquemas comentados de la mecánica humana*", Editorial Médica Panamericana, ed. Madrid, 2006.

[5] Zapatero, A.; Rodríguez, J.; Aguilar, J.; Castillo, E. *"Dispositivo Robótico Coadyuvante para la Rehabilitación de Dedos de la Mano"*, Asociación Mexicana de Mecatrónica, A. C. páginas 211-220, 2016.

[6] Puchades, A. *"La mano, Admirable don del Hombre".* Disponible en línea en http://www.biblioteca.org.ar/libros/89297.pdf. Recuperado el 02 de abril de 2018.

[7] Soto, M.; Jimmy W.; Gini, G. *"Robotic Hands: Design Review and Proposal of New Design Process"*, Proceedings of the World Academy of Science: Engineering and Technology, 2017.

[8] Gorgues, J. *"Ortesis para los dedos de la mano",* COF de valencia, volumen 28, numero 2, 2009.

ISBN: 978-607-9394-14-1.



[9] González, M. *"Evaluabilidad de los programas del robot amadeo en la rehabilitación de la mano del hemipléjico",* TOG (A Coruña), páginas 1-20, 2014.

[10] Aguilar, j. "*Sistema robótico para asistencia en terapias de rehabilitación de movimientos de la mano*", posgrado en tecnología avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro, 2014.

[11] Rodríguez, J., Aguilar J., Castillo E. *"Análisis de Trayectoria de Flexoextensión para el Dedo Índice Basado en Procesamiento de Imágenes para un Mecanismo Rehabilitador".* Innovaciones en Mecatrónica, ISBN: 978-607-9394-11-0, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Querétaro. Mexico. 1ª Edition, 265–276. 2017.

[12] Norton, R. "*Design of Machinery: An Introduction to the Syntesis and Analysis of Mechanisms and Machines*", (MacGraw Hill, Ed.) (5ª. Ed.), 2012.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 593-600.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Robot Humanoide y Literatura Infantil como Elementos de Educación para la no Violencia

Barbosa Cuesta Daniela A., Guzmán Luna Juana M., Cabezas Ortiz Daniel F. y Gutierrez Rios Ronald S.

Universidad de La Sabana.

Resumen

El presente estudio se enmarca en el uso de un robot humanoide y literatura infantil para apoyar la educación de la no violencia. Para esto, se ha utilizado un robot que simula contar una cuento a los niños, ejecutando el audio y gesticulando a medida que lo cuenta. El cuento tiene un contenido de alto impacto que busca que no se normalice la violencia intrafamiliar. En otras palabras, busca que los niños entiendan que los golpes, el maltrato y en general la violencia, no pueden volverse normales, así sean frecuentes en sus contexto. Como parte de la investigación se ha planteado un estudio piloto donde se ha puesto un robot humanoide de tamaño pequeño para narrar el cuento, con un grupo de 15 niños entre los 7 y 12 años de edad, buscando observar sus respuestas tanto frente al cuento, como al uso del robot como elemento de mediación tecnológica. Finalmente, como principal resultado, se ha observado que los niños son altamente receptivos a este tipo de práctica, encontrando también como hallazgo principal que el rol del robot no debería ser el de un simple narrador, sino que se obtendría mayor provecho si el robot es también un personaje dentro de la historia.

1. Introducción

Colombia es actualmente uno de los países más violentos a nivel mundial [1]. No solamente por más 50 años de guerra civil sino también por unos indicadores verdaderamente alarmantes sobre la violencia entre parejas y hacia niños, niñas y adolescentes [2]. Tal como lo indica Medicina Legal, existen 77.182 casos en total de violencia intrafamiliar ocurridos en Colombia durante 2016, de los cuales, 60.788 corresponden a violencia de pareja (50.707) y violencia a niños, niñas y adolescentes (10.081). Esto representa un importante problema puesto que el maltrato infantil está asociado con alteraciones propias de la víctima. Por ejemplo, existen trabajos que postulan alteraciones en la producción hormonal (del cortisol o la norepinefrina) o bien puede estar alterado el número de los receptores intracelulares de estas hormonas. Por tal motivo se crea un estado de "hiperexcitabilidad" permanente, que les condiciona un estrés crónico. Consecuentemente, esta alteración hormonal o de sus receptores puede modificar la respuesta a futuros estímulos estresantes, ya sea por exceso o por defecto. Incluso, se han encontrado cambios en las conexiones fronto-límbicas [3], áreas del cerebro que se encargan de la toma de decisiones y el control de las emociones, respectivamente. Además,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



está asociado con diversas expresiones de violencia tales como agresión a la pareja y a personas no familiares [4], creando así, un círculo vicioso de violencia que comienza con el maltrato en la niñez.

Se sabe que el cerebro de un bebé no se encuentra totalmente desarrollado, y las áreas cerebrales no funcionan de una forma completa. Durante el crecimiento, el cerebro se desarrolla y madura, y es durante estos primeros momentos de la infancia (de 0 a 5 años) que el cerebro es más sensible y receptivo al exterior. Si el niño vive experiencias positivas, el cerebro se desarrolla sano y adquiere sus capacidades. Sin embargo, si existe una interrupción de los estímulos positivos o si, peor aún, nunca han existido, puede afectar profundamente al desarrollo funcional del cerebro del niño, con consecuencias irreversibles [3].

Se evidencia así la magnitud y el impacto que genera el maltrato infantil. Por otro lado, se ha visto que la persistencia de conductas agresivas luego de los 3 años está vinculada a problemas como bajo rendimiento académico, adicción a sustancias, violencia intrafamiliar, delincuencia juvenil y adulta e incluso precocidad sexual. [5] Sin embargo, existen factores que contribuyen a aumentar la probabilidad de violencia en las familias. De manera individual se puede mencionar el nivel socioeconómico, el grado de educación, el uso de alcohol y drogas y haber sido víctima o testigo de violencia en el hogar. Y, por otro lado, se encuentran los factores sociales o comunitarios, los cuales radican en un entorno violento, la debilidad de las instituciones de control y las normas culturales [6].

Por todas estas razones, se hace necesario la incursión en proyectos que intenten reducir estas cifras tan alarmantes, que ataque directamente esta problemática y brinde su aporte a esta sociedad precaria en valores, en principios de buena ciudadanía y en ideas para la construcción de la paz. Todos estos esfuerzos finalmente podrían en conjunto evitar la perpetuación de una cultura entorno a la violencia y reducir el número de individuos afectados por las complicaciones más graves del maltrato infantil [7], con una importancia que puede incluso extrapolarse a los temas nacionales más relevantes, como lo son la finalización de la violencia por parte de los grupos armados, la inclusión social, la reducción de muertes por año, la lucha contra la corrupción y demás temas que aquejan a la nación.

Por este motivo, en este capítulo se van a exponer los resultados de la prueba piloto sobre un proyecto cuyo fin es enseñar a los niños el significado de la violencia y sus consecuencias negativas sobre el desarrollo moral en los individuos a través de un cuento y un robot.

2. Metodología

Se llevó a cabo una prueba piloto con 15 niños de edades comprendidas entre los 7 y los 12 años, en una fundación ubicada en un barrio con altas condiciones de vulnerabilidad de la ciudad de Bogotá, Colombia, a través del cuento En el espejo del autor español Luis A. Pisa Tolosa.

Fase 1 . *Programación de Hobbit*

Antes de llevar a cabo la aplicación de nuestra investigación, se realizó la debida programación del robot, sincronizando sus movimientos a lo que iba mencionando el relato. Para este fin se ingresó a la página http://hovis.co.kr/guide/dr_sim_eng.html, desde la cual se descargó el programa DR-Sim, que es la interfaz propia del robot HOVIS implementado para este proyecto. Por otro lado, se conectó el robot al pc por medio de un puerto USB. Después de conectar el robot, se ingresó al programa (DR-Sim) y se dio clic en la opción “Connect”. Después de que el robot ya estuviera conectado y vinculado con el programa, ya era posible guardar los movimientos. De esta manera, por cada movimiento realizado en el robot, se daba clic en la opción “Capture” y así quedaba

ISBN: 978-607-9394-14-1.



guardado para luego ubicar dicho movimiento dentro de la línea de tiempo que ofrece el programa. Y así, movimiento por movimiento, al estilo StopMotion, se creó una coreografía que estuviera acorde con lo narrado por el libro, de manera que el robot finalmente se viera gesticulando y representando los hechos que iban ocurriendo a lo largo de la historia.

Fase 2. *Aplicación de la prueba piloto en fundación*

Para presentar a Hobbit a los niños, los ubicamos en media luna frente al robot, a continuación les explicamos lo que iba a suceder y los invitamos a que le prestaran mucha atención a la historia que estaban por escuchar. Es importante aclarar que para llevar a cabo esta investigación se contó con el aval y apoyo de la fundación.

La historia fue relatada 2 veces para que los niños tuvieran la posibilidad de prestarle mucha atención a los detalles de la misma. Al finalizar la narración, se le pidió a los niños que se ubicaran en mesa redonda para poder hablar acerca de lo que acababan de escuchar y de este modo llevar a cabo la medición del impacto del proyecto.

Fase 3. *Grupo Focal*

Para evaluar la influencia del proyecto en los niños, se implementó la técnica de evaluación cualitativa grupo focal, el cual tiene como principal fin explorar un fenómeno a evaluar a través de la reunión de un pequeño grupo de personas que van siendo guiadas por un moderador, este facilita la discusión y el debate del tema que se esté investigando, en nuestro caso la literatura y la robótica como herramienta para promover la no vulneración de derechos en la infancia, especialmente el derecho a la no violencia.

Se realizaron 10 preguntas, las cuales giraban en torno a la violencia, su manifestación en la historia y sus formas de expresión. (Anexo 1.) Al estar trabajando con niños, requeríamos que la forma en la que se desarrollara la discusión fuera entretenida, por lo tanto, utilizamos bombas e introdujimos las preguntas en ellas y enumerándolas para que no se perdiera la coherencia de la actividad. Para leer la pregunta dos de los niños tenían que romper la bomba que se les indicaba, sacar el papel y entregárselo al facilitador. La duración aproximada de este fue de 60 minutos.

Fase 4. *Cierre de la jornada*

Para cerrar el tema se realizó una reflexión a los niños respecto a la violencia y a la importancia de no poder normalizarla, se les agradeció por su participación, disposición y tiempo, para finalmente compartir un refrigerio con ellos.

3. Resultados

Con base en el pilotaje, se llevó a cabo un análisis temático de redes de las creencias que tienen los niños acerca de la violencia a través de literatura y robótica, que se puede apreciar en la figura 1. La red temática se constituye de temas organizadores que están en color rojo y temas básicos en color amarillo, los cuales serán explicados a continuación. A partir del análisis de la información recolectada dentro del grupo focal con los niños, se presentarán fragmentos que fueron considerados relevantes para evidenciar los temas.

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 593-600.
ISBN: 978-607-9394-14-1.





Figura 1. Red temática

El tema global hace referencia a las creencias que tienen los niños a cerca de la violencia, que fueron indagadas a través de herramientas de literarias (cuento) y robótica (robot), esta categoría muestra cómo los niños pueden tener un amplio conocimiento teórico frente a lo que es la violencia y como esta se manifiesta, pero adicionalmente como aquello que aprenden en casa y dentro de su cotidianidad también empieza a tener un significado mucho más relevante para ellos y entra dentro de sus creencias. A partir de este tema, surgieron cuatro temas organizadores: manifestaciones de violencia, consecuencias de la violencia, construcción de concepto de la violencia y robot como herramienta para transmitir información.

Manifestación de violencia

Este tema organizador se refiere a los diferentes lugares en donde se puede manifestar la violencia y los espacios donde los niños están más vulnerables a presenciarla. Dado lo anterior se observan como temas básicos; violencia en su contexto social, violencia física y violencia en el núcleo más cercano.

Violencia en su contexto social

De acuerdo al primer tema básico los niños hacen referencia el contexto social como un lugar donde se puede ver manifestada la violencia ejercida por diferentes individuos dentro de su entorno. Esto se puede evidenciar cuando los niños refieren que “Las personas violentas tiene armas cortopunzantes como el cuchillo”-C. así como también mencionan “Las personas violentas roban y matan”-N.

Violencia Física

Dentro del segundo tema básico encontramos todas esas manifestaciones físicas de violencia, las cuales para los niños fueron muy relevantes tanto en lo que entendían de la historia, como en lo que consideraban representaba signos muy claros de maltrato, aspectos como golpes,

ISBN: 978-607-9394-14-1.



fracturas, morados, entre otros; expresándolo en frases como “cuando el papá le pegaba y también cuando los amigos le pegaron al papá”-K, de igual manera fue un patrón común en los dibujos realizados por los niños como el que se muestra a continuación.



Figura 2. Dibujo de participante

La figura 2 es una imagen que viene acompañada del siguiente relato: “a la familia, al papá lo dibujé con el brazo herido, al niño preguntándose porqué estaban heridos y contra el espejo, la mamá golpeada, con el ojo morado”´J.

Violencia en el núcleo más cercano

El tercer tema organizador incluye aquellas acciones que se pueden vivir dentro de un hogar y los niños percibirlas como violentas, los sujetos que realiza estos actos en su mayoría tienen una relación o vínculo muy cercano con los niños, dentro de la historia en el espejo este fue el tema central y los niños lo supieron entender y narrar, evidenciándose de la siguiente manera “cuando el papá le pegaba a la mamá”-C “Cuando el papá llegó golpeado por los amigos”-J “por los parces”-N.

Consecuencias de la violencia

Este tema organizador hace referencia a todo aquello evidenciado que se estaba presentando como una consecuencia de la manifestación de violencia para los niños, dentro de este tema se incluyeron la normalización de la violencia y la polarización de la idea de una persona violenta.

Normalización de la violencia

Este tema organizador destaca que a pesar de que para los niños no está normalizada la violencia y expresan el modo en el que se debe actuar si se está presentando; Es importante destacar como de una manera implícita y debido a su contexto sí están viendo como normal actos delincuenciales que expresar un grado de violencia muy alto, pero que para ellos ya hace parte de una cotidianidad. Lo mencionado anteriormente se puede evidenciar en frases como: “Cuando el papá… cuando el papá le dice que… que… que no era nada”-L, o “las personas violentas roba y a veces dicen: dame tu plata”-N.

Polarización de la idea de una persona violenta

Este tema se asocia a cómo los niños llevan la imagen de una persona violenta a dos extremos, generando así una polarización. Por un lado se encuentra el ser violento que comete actos delincuenciales tales como violación, secuestro, robo, entre otros que lo llevan así a consecuencias como la cárcel o la muerte; por otro lado muestran a una persona que genera opresión y obliga, en

ISBN: 978-607-9394-14-1.



su mayoría dentro de los hogares, esto genera que los niños no perciban la violencia a no ser que esta sea muy fuerte y sientan que necesitan escapar de ahí. Lo mencionado se puede manifestar de la siguiente manera: "si una persona la está violado o le está haciendo algo violento a uno, uno tiene que gritar por si alguna persona está, gritar o si no gritar más duro para que le dejen de hacer lo que le están haciendo"-MP, de igual forma en frases como: "los obligaban, a latigazos, los obligaban, les pegaban"-CP.

Construcción del concepto de violencia

El tema organizador expresa aquello que a lo largo de la jornada los niños fueron mostrando respecto a su definición de violencia y cómo, aunque tenían claro la teoría del maltrato, la existencia de diferentes tipos de violencia y la manifestación de la misma; predominado la visión de una idea de violencia represiva, donde hay imposición, en su mayoría en acciones. Dentro de esta hacen parte los temas de falta de respeto, acción-reacción y mujer como figura vulnerable.

Falta de respeto

Este tema muestra una de las ideas más recurrentes en los niños y en cómo la violencia radica en el daño a un otro, en la poca capacidad para ponerse en su lugar y la opresión de la libertad. Esto se manifiesta de la siguiente manera : "La violencia es que muchas personas obligan a los niños hacer cosas que no quieren"-J, "cuando alguna persona, una persona maltrata a otra persona, le grita o le pega, o la maltrata o también le dice malas palabras"-MP así como también "pa' que uno quiere que lo respete… tiene que respetar"-CP.

Acción-Reacción

Dentro de este tema se evidencia cómo después de una acción violenta siempre existirá una reacción o consecuencia por parte de quien está siendo violentado, ya sea la implementación de miedo, resignación, dolor o enojo de quien recibe el maltrato, así como también el inicio de un círculo vicioso de donde no pueden salir ninguno de los implicados. Esto se evidencia en la figura 3, dibujos realizados por los niños que se muestra a continuación:



Figura 3. Dibujo de participante

Asimismo los niños expresan como se puede ejercer acciones de parte de la víctima al sufrir maltrato, no solo de forma negativa sino también positiva, esto se evidencia cuando dicen "No, toca… toca ir… toca denunciar aquí en la fiscalía .- K. Aquí se observa como existe la claridad de un actuar en contra de la violencia, y como una forma de seguir un protocolo legal es visto como una buena forma de dar fin a esta problemática.

Mujer como figura vulnerable

Robótica y Mecatrónica, Capítulo 47, pp. 593-600.
ISBN: 978-607-9394-14-1.



Este tema base expresa como el hecho de que la mamá fuera la violentada dentro de la historia, generó en los niños una reflexión acerca de cómo la mujer está inmersa en una imagen de vulnerabilidad donde el maltrato se registra de una manera significativa en los diferentes contextos de nuestro país, pero al mismo tiempo manifiestan como esta merece respeto: " Que no debemos maltratar a las mujeres ni a los niños y que no, nunca debemos hacer violencia"-JS "Porque… uno… tiene que respetar a las mujeres, ¡Ja!"-J "Estaba mal porque… a uno no se le tiene… que pegar, y a las mujeres se les… las respetan"- CP.

Robot como herramienta para transmitir información

Este tema organizador busca determinar la asociación que se encuentra dentro de el tema de la robótica con la comprensión del relato. Se busca determinar si el robot fue una herramienta funcional y protagonista dentro de la historia para ayudar a la comprensión del tema y focalizar la atención de los niños. Dentro de este tema se encuentran dos temas básicos; comprensión de la historia y asociación del robot con la historia.

Comprensión de la historia

Se observa dentro de este tema que la comprensión de la historia fue buena, todos los niños lograron responder a las preguntas del grupo focal e hicieron asociaciones claras del cuento frente a la violencia. Sin embargo a través del robot como herramienta de interpretación generó confusión en los niños, pues al preguntar si habían entendido la historia a medida que el robot la iba contando muchos manifestaron que no, como se evidencia en el momento que los entrevistadores decían: "¿Ustedes le entienden los movimientos que él hacía?"- E "¡Nooooo!"-T. A pesar que consideraron que el robot fue una buena herramienta dentro del cuento y atrapó su atención, no se vinculó claramente el papel del mismo dentro del relato.

Asociación del robot con la historia

Este tema básico si vincula fuertemente con el anterior, pues los niños muestran la incomprensión de la actuación y los movimientos del robot asociados al cuento. Cuando el entrevistador mencionaba "¿Cómo les pareció que Hobbit actuó la historia, creen que Hobbit lo hizo bien?"-E. Algunos manifestaban que comprendía y otros no. Esto puede evidenciar un necesario ajuste del robot a la historia para que logre no solo captar la atención de los niños, sino también ser fuertemente vinculado con el cuento y la formación en el tema de violencia. Del mismo modo los niños involucran al robot dentro de la historia como si al narrar el fuera el protagonista de la misma, lo cual ayuda a que los niños se conecten con la historia, pero al mismo tiempo exista una deshumanización del personaje que en este caso juega un papel fundamental dentro de la historia.

4. Conclusiones

Como resultado del pilotaje realizado en el presente proyecto, se observó que los niños observan las marcas en el cuerpo (como los morados) como una señal de violencia o maltrato. De igual manera, para ellos, la violencia está relacionada con el uso de armas o el contacto directo; en este sentido asuntos como la violencia psicológica se hace más difícil de identificar. Adicionalmente, los niños manifestaron la gravedad que tiene el maltrato cuando sucede en el núcleo más cercano, ya que a nivel familiar se espera que el maltrato no sea algo normal.

En cuanto a la normalización de la violencia comprendieron que es algo que se debe evitar y denunciar. Entendieron que los signos de agresión son muestras claras de violencia, y que su



gravedad es alta, de modo que no debe entenderse como algo normal, por frecuente o común que pueda llegar a ser. Además, consideraron que la agresión hacia la mujer es más compleja, debido a la vulnerabilidad que presenta.

Frente al uso del robot como herramienta tecnológica de mediación, los resultados mostraron que la historia fue entendida a un nivel satisfactorio, sin embargo, aunque el robot sirvió como elemento motivacional, llamando por completo su atención, no fue del todo entendido su papel dentro de la historia. No lograron ver al robot como el narrador de la historia, sino que buscaban verlo como parte de ella, por tanto se generó una ligera confusión en cuanto al protagonista de la historia, ya que algunos llegaron a pensar que era el robot. Por tanto como resultado y recomendación final, se concluye que el uso del robot podría aprovecharse en mayor medida, si el robot que cuenta cuentos, no es solo el narrador, sino que se logre adjudicar un papel para él dentro de la historia, pareciendo que no es una historia que cuenta como un externo, sino que es una historia propia. Esto permitirá que el cuento tenga mayor coherencia para el entendimiento de los niños.

Referencias

[1] The Institute for Economics and Peace. “Peace Index 2017”,Institute for Economics & Peace, páginas 13 y 19, 2017.

[1] Moreno, S. et al. *“Forensis: Datos para la vida”*,*Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses*. Volumen 18, Número 1, páginas 211-215, 2016.

[3] Giménez-Pando, J.; Perez-Arjona, E.; Dujovny, M.; Díaz,F.G. *“Secuelas neurológicas del maltrato infantil”*, *Neurocirugía*. Volumen 18, Número 2, páginas 95-100, año 2007.

[4] Ochoa, O., Restrepo, D., Salas Zapata, C., Sierra, G. M., & Torres de Galvis, Y. *“Relación entre antecedente de maltrato en la niñez y comportamiento maltratador hacia los hijos.Itagüí, Colombia, 2012-2013”*, *Revista Colombiana de Psiquiatria*. Elsevier España, 2017.

[5] Martínez-González, M. B., Robles-Haydar, C. A., Amar-Amar, J. J. & Crespo-Romero, F. A. *“Crianza y desconexión moral en infantes: Su relación en una comunidad vulnerable de Barranquilla”*, *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*. Volumen 14, Número 1, páginas 315-330, año 2016.

[6] Salas Bahamón, L. *“Transmisión intergeneracional de la violencia intrafamiliar: evidencia para las familias colombianas”*, *Desarrollo y Sociedad*. Número 56, páginas 285-337, año 2005.

[7] Juan M., M., Elena, G., Macarena, B., & José M., P. *“Application of a child abuse prevention programme in an educational context / Aplicación de un programa de prevención del maltrato infantil en el contexto educativo”*, *Anales De Psicología*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, Volumen 30, Número 3, páginas 1014-1024, 2014.

Robótica y Mecatrónica

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.
Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E
Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro.
Se tiraron 1000 ejemplares, en formato digital pdf,
tipo CD-Rom, pp. 660, Tamaño: 45 Mb.

ISBN: 978-607-9394-14-1


ISBN: 978-607-9394-14-1
9 786079 394141